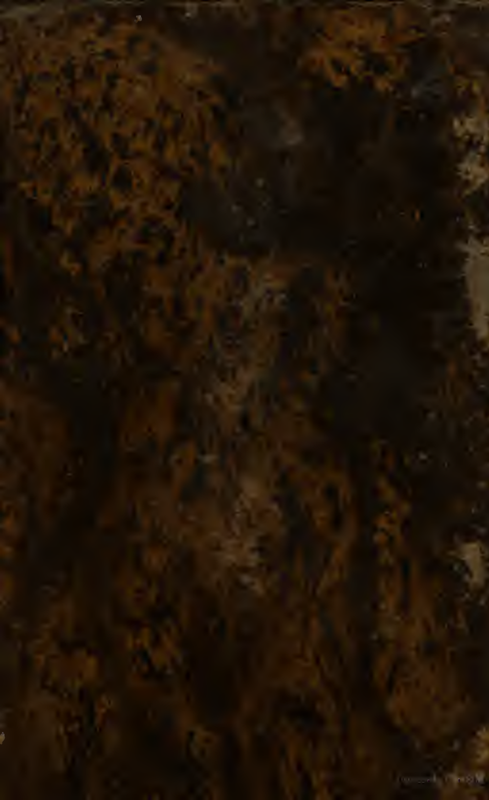
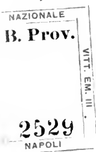



FONDO PIZZOFALCONE


BIBLIOTECA PROVINCIALE
Armadio
Palchetto
Num.° d'ordine


NAZIONALE
B. Prov.
VITT. EM. III
2529
NAPOLI

ELEMENTI

DI FISICA

ELEMENTI

DI FISICA

PER

M. ZANNOTTI

Professore di Fisica Matematica nella R. Università degli Studii,
e di Fisica Sperimentale nella Regia Scuola di Marina ;
Socio ordinario del R. Istituto d'Incoraggiamento alle Scienze Naturali
Socio Residente dell' Accademia Pontaniana, e Corrispondente
della Società Economica della 1ª Calabria Ulteriore.

TERZA EDIZIONE
interamente rifatta dall' autore



NAPOLI
STABILIMENTO TIPOGRAFICO DI F. VITALE
Largo Regina Coeli n° 2 e 4.
1864.



PREFAZIONE

È tanta la mole dei fatti e delle teoriche, di cui l'odierna Fisica è in possesso, che a voler tutto stringere in una opera sola, essa dovrebbesi necessariamente comporre di molti volumi. Ma in mezzo a tanta copia di cose una mente usata alla meditazione dei fenomeni naturali scorgerà di leggieri che ve n' ha di quelle che sono come di sustrato alle altre, e che perciò fa d'uopo attentamente esaminare prima che si voglia prender cognizione delle rimanenti. È sono appunto questi fatti fondamentali che debbono costituire la materia di quelle opere che i nostri maggiori ponderatamente denominavano *Instituzioni*, che i Tedeschi con voce egualmente espressiva appellano *Grundlhere* (dottrina fondamentale), e che ora noi a modo francese diciamo *Trattato elementare* o semplicemente *Elementi*.

Una Instituzione, o Trattato elementare che dir si voglia, non è opera superficiale come pare che i più volessero riguardarla, ma in vece è tal lavoro da bisognarvi profonda meditazione; imperocchè oltre alla grave difficoltà di scegliere i fatti che sieno soli e veramente fondamentali, ordinarli per le loro naturali analogie, ed accennare ai punti di attacco che possono avervi i fatti congeneri, rimane ancora l'altra non meno grave difficoltà di conciliare la severità della dottrina colla chiarezza del dettato.

Nè un'Instituzione può aver nulla di comune colle così dette *opere popolari*. Un trattato di questa specie, e sia a mo' di esempio di Fisica, non potrà far comprendere i

principali trovati di questa scienza, se non parlando più all'immaginazione, sempre prevalente nelle menti incolte, che alla ragione priva del necessario addestramento; in un'opera di tal fatta le similitudini, che formano tanta parte della logica del volgo, dovranno prendere il posto delle vere dimostrazioni, che per mancanza di studii preliminari all'uopo necessarii diverrebbero incomprensibili. Purchè l'idea pervenga ad esser percepita, lo scopo del trattato popolare è raggiunto, non importa il mezzo che siasi adoperato; il quale sarà in generale tanto più lodevole, per quanto più ovvie saranno le cognizioni in cui si è cercato. Così il Cagnoli nelle sue *Notizie Astronomiche*, non mai abbastanza lodate come opera popolare (1), trova negli stecchi di un ventaglio che si apre, il mezzo di far capire che voglia significare un angolo, e dalle diverse proiezioni visuali di una lampada sospesa egli fa bellamente sorgere l'idea di paralasse. In una Instituzione al contrario, posto che uno dei nobilissimi fini della cultura intellettuale sia il buono addestramento della ragione, la fonte da cui l'idea deve scaturire è qualche cosa più importante dell'idea stessa.

Un altro difetto, e ci sembra gravissimo, si osserva ancora in parecchie delle moderne instituzioni specialmente di Fisica (2), ed è quello di esser monche o almeno sproporzionate nelle loro parti. Grande che sia lo sviluppo a giorni nostri avvenuto nelle teoriche dell'elettricità, del calore e della luce, ciò non formerà giammai una buona ragione per far rincattucciare in poche pagine, e Dio sa come, i grandi trovati di Galilei e di Newton. Nè vale il dire che talune parti della Fisica vadano meglio trattate nella Meccanica razionale, imperocchè così discorrendola si fa mostra di non aver nettamente compreso che sia og-

(1) In quantità ma non in pregio di opere popolari l'Italia è superata dalle altre nazioni civili: la Francia, l'Inghilterra, la Germania non hanno opere popolari comparabili alle *Notizie Astronomiche* del Cagnoli ed all'*Idraulica Fisica* del Mengotti.

(2) Mi guardi il Cielo di onorare con questo nome quei guazzetti di Geometria, Aritmetica, Fisica, Storia, ecc. ecc. che ora sotto il nome di una Ditta, ora sotto quello di un'altra ci piovono a diluvio per esser smerciati nei nostri Ginnasii e Licei, e quasi tutti portanti in fronte il marchio della servitù del pensiero: A NORMA DEI PROGRAMMI UFFICIALI.

gi Meccanica razionale, e che sia Fisica. La prima non trova che esempii nelle forze individualmente considerate, mentre la seconda ne forma il suo precipuo obbietto: la dottrina del pendolo, verbigrazia, non è in Meccanica che un caso specialissimo della teorica generale del moto di un punto su data superficie, mentre nella Fisica è come un centro intorno a cui si aggruppano, immediatamente l'intera dottrina della gravità e mediatamente le altre. Egli è vero che la Fisica tende a compendiarsi in una serie di corollarii della Meccanica razionale; ma finchè un tal grado di perfezione non siasi raggiunto, ragion di metodo vuole che ciascuna delle due scienze non esca dal suo demanio. Quando io veggo che un uomo sommo, come il Mossotti, nella sua egregia *Meccanica razionale* dà cominciamento alle teorie dinamiche colle leggi della caduta dei gravi, allora con Orazio:

« Indignor quandoque bonus dormitat Homerus ».

Colla scorta di questi principii mi son messo ad esaminare rigorosamente ciò che io aveva fatto nella 2ª edizione di quest'opera, esaurita da più di un'anno, e debbo confessare di non averla trovata soddisfacente nè per forma nè per estensione; e quantunque fosse stata favorevolmente accolta, purtuttavia io sentiva che questa indulgenza non mi dava facoltà di mancare al primo dovere di ogni scrittore, che è quello di esser coscienzioso. Quindi non mi rimaneva che delle due cose l'una, o non riprodurre la mia Fisica, o rifarla da capo. Mi sono appigliato al secondo partito, sentendomi tuttavia il coraggio di durare nell'ingrato lavoro di una nuova compilazione; e posso assicurare di avervi impiegato tutte le mie forze.

All'epoca in cui io pubblicava la 2ª edizione di quest'opera si sentiva ancora il bisogno di far avvertiti e discenti e docenti, che senza sufficiente cognizione di Matematica, almeno elementare, è impossibile di ben comprendere le fondamentali dottrine della Fisica. Oggi, la Dio mercè, le cose stanno diversamente; non v'ha per così dire operetta di Fisica, in cui non si veggano formole matematiche là dove n'è bisogno. Ma dalla instituzione scritta al-

l'insegnamento orale corre ancora un gran divario: conscio della deficienza di cognizioni matematiche in coloro che ne ascoltano la lezione, il professore si trova quasi che sempre costretto a limitarsi in generali considerazioni, che a nulla valgono quando non si possono concretare in cifre numeriche. Questo danno ci è venuto da quel non so che di ciarlatanesco che suol guastare il privato insegnamento, or dando a vedere che basti l'abbicì per apparare qualsiasi disciplina, or promettendo un'enciclopedia in trenta lezioni. Abbiamo però ragion di credere ad un prossimo radicale immegliamento dei Ginnasii e Licei delle provincie italiane, e che in conseguenza lo studio della Fisica, ancorchè limitato ai primi rudimenti, vi sarà fatto con metodo severo; senza di che è follia sperare che il gusto per la Fisica superiore, malamente denominata *Fisica matematica*, possa mai sorgere nella nostra gioventù. Finchè il primo latte ci sarà dato con una Fisica da speziale, la parte elementare della scienza e la superiore resteranno separate da un abisso, che niuna istruzione matematica potrà mai colmare!



LIBRO PRIMO.

NOZIONI DI MECCANICA RAZIONALE.

CAPO PRIMO.

INTRODUZIONE.

Tutti i cangiamenti del mondo fisico
possono ridursi a movimenti.
ARISTOTILE.

1. Se ci facciamo a considerare ciò che avvi di comune in tutte quelle apparenze del mondo fisico, che collettivamente dinotiamo colla voce *fenomeno*, troveremo che tutte vanno a risolversi in un transito da luogo a luogo, sia di tutto un corpo, sia delle sue minime parti. Così le gocce di acqua, formate in seno all'atmosfera, *cadendo* sulla superficie terrestre costituiscono il fenomeno della pioggia; in un periodico *elevarsi* ed *abbassarsi* delle acque del mare sta il fenomeno della marea; un *tremito*, generato in alcuni corpi e trasmesso all'organo dell'udito per mezzo dell'aria o di altro veicolo, costituisce il fenomeno del suono; ecc. ecc. In ogni fenomeno vi è dunque passaggio da luogo a luogo, ossia in ogni fenomeno vi è *moto*.

Idea generale dei fenomeni.

Avvi purtuttavia dei casi, in cui questa forma generica dei fenomeni, per l'estrema lentezza con cui si attua, sfugge all'osservazione immediata. Sciolgasi, a modo d'esempio, del sale comune in una certa quantità di acqua; e filtrata la soluzione perchè riesca perfettamente limpida, si lasci in riposo per alquanti giorni. Si potranno allora scorgere sul fondo del

recipiente certi piccoli corpi trasparenti, che raccolti ed esaminati, si troveranno non esser altro che cristalli di sal comune. In quel lento aggrupparsi delle minime particelle saline il moto è sfuggito al senso, ma il fatto della loro unione dimostra che un moto si è compiuto.

Divisione della Scienza della Natura in Fisica e Chimica.

2. La fusione di un solido, l'evaporazione di un liquido, ecc. sono moti molecolari che in generale lasciano inalterata la composizione elementare del corpo in cui si producono; ed ogni volta che questa condizione rimane soddisfatta, l'indipendenza di consimili moti dalla speciale natura del subbietto fa che si possano riprodurre con sola differenza di quantità in ogni altro aggregato materiale. Al contrario si conosce buon numero di altri moti molecolari, che attuandosi fanno cangiare la natura dei corpi che ne sono il subbietto, sia producendo nuova disposizione nei loro elementi, sia introducendone dei nuovi e talvolta in luogo di alcuni di quelli che prima vi erano. Così in ogni combustione attuata in seno dell'atmosfera, questa aggiunge parte del suo elemento ossigeno a quelli del corpo combustibile; nella effervescenza prodotta pel contatto del marmo coll'acido solforico, questo liquido prende il luogo dell' acido carbonico che vi era e che si svolge in forma di aria, e così il marmo è trasformato in gesso. In casi consimili vi è sempre il giuoco di un nuovo elemento, il quale o si aggiunge semplicemente ai preesistenti, o prende il luogo di alcuno di essi. Ma nell' esplosione della polvere da sparo o di un composto fulminante non vi sono elementi aggiunti o scambiati, ma vi è soltanto una nuova combinazione dei medesimi costituenti del corpo.

Ed ecco come la scienza dei fenomeni del mondo fisico (1)

(1) Se col nome di *Scienza della Natura* vogliamo indicare non il solo elemento teoretico della cognizione, ma la cognizione intera del mondo fisico, allora sarà d' uopo distinguerla in *teoretica* e *descrittiva*. La prima si comporrà della Fisica e della Chimica, e la seconda formerà la Cosmografia, prendendo questa voce in tutta l'estensione del suo valore etimologico. Così la Botanica, la Zoologia, la Mineralogia, la Geologia, la Meteorologia, l'Astronomia, ecc., come istorie sono branche della Cosmografia, ma come scienze, non hanno elemento teoretico, che non sia riflesso di verità fisiche e chimiche.

viene per sè stessa a dividersi in due grandi sezioni, delle quali una si occupa dei fenomeni attuabili in ogni sorta di materia, l'altra di quelli che in tutto dipendono dalla speciale natura dei corpi. La prima di queste due grandi sezioni costituisce la *Fisica*, la seconda la *Chimica* (1).

3. È noto per ovvia osservazione come i corpi, una volta ridotti al riposo, perdurino in questo stato, finchè una cagione esteriore non venga a turbarli; la materia non può dunque da sè stessa mettersi in moto. E nemmeno può per sè medesima tornare dal moto alla quiete; imperocchè se vediamo i moti artificiali, quando non sieno continuamente ristorati, andar scemando a poco a poco fino a cessar del tutto, ciò non dipende da intima azione del mobile, ma invece dalla resistenza dell'aria, e da quella dell'attrito contro i punti di sospensione o di sostegno. Ed in vero, poichè tutti gli spedienti, che valgono a diminuire le indicate resistenze, sono appunto quelli che procurano una maggior durata di movimento, ne segue per necessaria conseguenza che il moto prodotto risulterebbe perpetuo, se le resistenze potessero annullarsi del tutto. A raffermare la quale illazione valgono le osservazioni astronomiche, di cui comparando le più antiche alle recenti si trova che la durata del moto annuo e diurno della terra non è sensibilmente variato nel corso di molti secoli, quantunque lo spazio planetario non sia perfettamente vacuo di materia. Ma se quel fluido tenuissimo, che vi è diffuso, ha forza di accelerare continuamente il ritorno della cometa di Encke (2), la quale al

Inerzia della materia.

(1) È d'uopo purtuttavia osservare che questa distinzione, che oggi trovasi a livello dei fatti, potrebbe forse cessare di essere ammissibile quando la scienza, sempre progredendo, giungesse a farci vedere più innanzi nell'ordinamento molecolare dei corpi. Stantecchè, ad eccezione forse dei soli fenomeni di gravità e di riflessione speculare della luce, tutti gli altri spettanti al demanio della Fisica, presentano differenze di quantità nei corpi di diversa natura. Or queste differenze, che oggi sono note soltanto come fatti, potrebbero un giorno esser note nelle loro relazioni colla speciale natura dei corpi; ed allora la Fisica e la Chimica, che nel loro periodo descrittivo già componevano una sola branca di conoscenze, diverrebbero una scienza sola nell'ultimo perfezionamento delle loro teoriche.

(2) Le comete, movendosi in giro intorno al sole, debbono avere una ten-

pari delle altre comete è formata di sostanza estremamente rarefatta, non ha poi potuto far variare sensibilmente il moto della terra.

La proprietà, che ha la materia, di durare nello stato di moto o di quiete, in cui per avventura si trovi, si denomina *inerzia.*

4. Or se la materia non può dare a sè stessa il moto o la quiete, quegli esseri viventi che hanno spontaneità di locomozione, e che perciò possono, quando lor piace, mettersi in moto o tornare al riposo, debbono possedere qualche cosa, propria a produrre degli effetti che sono in aperta contraddizione coll' idea d' inerzia: questa cosa, per la quale la materia può passare dalla quiete al moto o viceversa, si denomina *forza* (1).

Idea della forza.

Or il moto, sia generato in un essere semovente, sia comunque prodotto in una massa inerte, è sempre identico; e poichè l'identità degli effetti obbliga a riconoscere quella delle rispettive cagioni, ne segue che non potremo concepire l' esi-

denza verso questo centro del nostro sistema, congiunta ad una forza di proiezione nello spazio; e le loro rivoluzioni debbono soddisfare la legge di compiersi in tempi, i cui quadrati siano proporzionali ai cubi delle loro medie distanze dal sole. Or queste distanze, e quindi i corrispondenti tempi periodici, non possono rendersi minori se non per incremento dell'attrazione solare, o per diminuzione dell'impulso primitivo. Escludendo la prima di queste due ipotesi, perchè inconciliabile collo stato delle conoscenze intorno alla gravitazione universale, non rimane a supporre che una diminuzione di forza proiettiva per azione di un mezzo resistente. Ed ecco come il ritorno sempre anticipato della cometa di Encke dimostra che lo spazio celeste non è perfettamente vacuo.

(1) Riponendo nella spontanea mobilità degli esseri animati la prima origine dell'idea di forza, ci troviamo in perfetto accordo coll'uso primitivo di questa parola, che fu quello d'indicare l'energia muscolare. Comunemente si pensa che bastasse il fatto della trasfusione di moto per mezzo dell'urto a menarci necessariamente all'idea di forza; ma ciò non è esatto. Imperocchè basta la sola impenetrabilità a rendere possibile la generazione del moto per mezzo dell'urto, e nell'idea d'inerzia si trova una ragione sufficiente della tendenza che ha il corpo urtato a perdurare nel moto che ha ricevuto. Laonde i due principali effetti dell'urto, produzione cioè di moto e tendenza a perdurarvi, si possono chiaramente comprendere senza l'intervento dell'idea di forza.

stenza di moto, che sia scompagnato dall'esistenza di forza. E perciò se ogni fenomeno è moto, ogni fenomeno si dovrà necessariamente riguardare come effetto di una forza.

Ma dall'azione di una forza non risulta sempre un moto effettivo; sovente non ne viene che una semplice tendenza a moto. Così la gravità terrestre che fa cadere verso il suolo ogni corpo abbandonato a sè stesso, non attua poi in un corpo sospeso o sostenuto, che una tendenza a discendere, la quale produce una tensione nel mezzo di sospensione, ed una pressione sul corpo che serve di sostegno.

In conseguenza, volendo presentare l'idea di forza sotto la forma più generale, diremo *forza* tutto ciò che produce moto, o almeno tende a produrlo.

5. L'urto e la pressione sono i mezzi più ovvii per trasfondere le forze da un corpo in un altro. Or questi mezzi riuscirebbero inefficaci, se due atomi di materia potessero nel medesimo tempo occupare uno stesso luogo; imperocchè il corpo urtante o premente non trovando allora veruna resistenza nel corpo urtato o premuto, vi passerebbe per lo mezzo senza turbarne lo stato attuale, e quindi non vi sarebbe comunicazione di moto. Ma questa comunicazione è un fatto; la materia è dunque *impenetrabile*, vale a dire che ogni sua minima parte non può occupare il luogo di un'altra, senza che questa ne sia rimossa. Impenetrabilità.

6. Se l'impenetrabilità non fosse, le forze prementi potrebbero ridurre anche il globo terrestre ad un punto geometrico. L'*estensione* dunque non sarebbe compagna indivisibile della materia, se questa fosse penetrabile. Estensione.

7. Si danno purtuttavia dei fatti che sembrano provare esser possibile in certi casi una compenetrazione almeno parziale di due quantità di materia. Prendasi all'uopo un tubo di vetro lungo circa venti pollici e chiuso in un estremo; se ne empia una metà di acqua, e l'altra di puro spirito di vino, badando a versarvelo dolcemente; indi si chiuda con un dito l'estremità aperta del tubo, e lo si capovolga a più riprese. Tornato che sia il tubo al riposo, si vedrà nel volume liquido una Porosità.

sensibile diminuzione , quantunque nessuna parte se ne fosse perduta nell'eseguito movimento.

Or se accanto a questo fatto ne poniamo un altro , qual' è quello della contrazione che ogni corpo patisce, quando si raffredda, vedremo come l' esperimento qui sopra descritto per nulla deroghi all'impenetrabilità della materia. Ed in vero se ogni corpo pel freddo si contrae , bisognerà dire che di ogni aggregato materiale le particelle sono ordinate in modo da lasciarvi quantità di spazietti voti. Or questi piccoli voti , che diconsi *pori*, sono quelli che rendono possibile la introduzione di un corpo in un altro, sia per impeto meccanico, come quello per cui si ficca un chiodo nel legno , sia per ispeciale azione molecolare, qual' è appunto il caso della mutua penetrazione tra l'acqua e lo spirito di vino. Tutti i fatti dunque che potessero citarsi in appoggio della penetrabilità della materia , sarebbero altrettante pruove della porosità dei corpi. Di che avremo in seguito nuovi argomenti della teorica della gravita.

CAPO SECONDO.

DEL MOTO IN GENERALE.

8. Sappiamo ogni fenomeno essere un moto, ed ogni moto supporre una forza. Or se ci facciamo a considerare i fenomeni sotto questa veduta semplice, e perciò generale, e se facciamo inoltre astrazione dalla speciale natura delle singole forze per non vedervi altro che cagioni di transito reale o virtuale da luogo a luogo, ci formeremo della scienza denominata *Meccanica razionale*, un' idea sufficiente a mostrarci quanta ne debba esser l' importanza nello studio della Fisica. Imperocchè ogni fenomeno è un fatto complesso, di cui non ci è dato poter altrimenti indagar la cagione, se non procedendo dal semplice al composto, ossia dall'idea generale di moto alla conoscenza della speciale attuazione di moto in cui sta propriamente l'essere di un dato fenomeno. La caduta di un grave, a modo di esempio, pare a prima vista che sia la cosa più semplice di questo mondo; ed intanto se ci facciamo ad esaminarla coi lumi che ci somministra la Meccanica razionale, troveremo che il suo modo di attuazione dipende dall' altezza del punto di caduta, dalla latitudine geografica del luogo, dalla densità sì del grave che dell'aria, ed infine dalla natura geologica del suolo e dai cangiamenti che le correnti vulcaniche possono indurre nella sottoposta massa terrestre. Importanza della Meccanica razionale nello studio della Fisica.

9. Or qualsiasi moto ha relazioni collo spazio, col tempo e colla forza che lo produce. Moto assoluto e relativo, rettilineo e curvilineo.

Le relazioni del moto collo spazio possono essere di sito e di forma. Pel rapporto di sito il moto è *assoluto* o *relativo*, secondochè i luoghi successivamente occupati dal mobile si ri-

feriscono allo spazio propriamente detto, ovvero ai corpi che vi sono. Così camminando a passi misurati lungo una strada piana e diritta, noi riferendoci agli oggetti che ci circondano, crediamo descrivere una linea retta ed accrescerla di parti eguali in tempi eguali. Ma se consideriamo che durante il nostro cammino la terra gira intorno al suo asse mentre corre per la sua via intorno al sole, allora comprenderemo che lungi dal descrivere una retta con moto equabile, noi ci moviamo inegualmente per una linea curva. E se alla relazione di sito aggiungeremo quella di forma avremo ancora a distinguere il moto in *rettilineo* o *curvilineo*, secondochè sarà retta o curva la linea percorsa, realmente nel moto assoluto ovvero apparentemente nel moto relativo.

Moto uniforme e vario.

10. Nella sua relazione al tempo il moto può essere *uniforme* o *vario*. È uniforme il moto, quando in tempi eguali vengono descritti spazii eguali; ed è vario se in tempi eguali si percorrono spazii diseguali. E poichè gli spazii diseguali possono essere in serie crescente o decrescente, così il moto vario si suddivide in *accelerato* o *ritardato*. È uniforme, a modo di esempio, il moto dell'indice di un oriuolo; al contrario un grave scende con moto accelerato, e spinto verticalmente in alto, sale con moto ritardato.

E dall'essere nel moto uniforme eguali gli spazii che sono percorsi in tempi eguali, segue che chiamando v lo spazio descritto dal mobile nell'unità di tempo, t la durata del moto ed s la lunghezza dell'intero cammino, dovrà reggere l' equazione:

$$s = vt,$$

donde:
$$v = \frac{s}{t}, \text{ e } t = \frac{s}{v},$$

per mezzo delle quali si potrà determinare una delle tre quantità s, t, v, quando le altre due sian date.

Lo spazio v descritto nell'unità di tempo, ossia il rapporto $\frac{s}{t}$ del numero esprimente lo spazio a quello che dinota il tempo,

si nomina *velocità*. Or se poniamo che spazii eguali sieno percorsi in tempi diseguali e quindi con diverse velocità, si avranno le due equazioni:

$$v=\frac{s}{t}, \quad v'=\frac{s}{t'},$$

dalle quali risulta la proporzione:

$$v:v'=\frac{1}{t}:\frac{1}{t'}=t':t,$$

ossia che la velocità dei mobili, i quali percorrono spazii eguali in tempi diseguali, sono inversamente proporzionali ai tempi.

Nel moto vario poi la velocità, come quella che continuamente cangia di valore, non potrà esser definita che per un dato istante; e per quel momento il suo valore numerico risulterà dal rapporto dello spazio infinitesimo allora descritto al tempo infinitesimo in cui è stato percorso. Questi spazii e tempi infinitesimi sono rappresentati dai simboli ds e dt, l'indice d stando in luogo di *differenza infinitesima*. Perciò nel moto vario si avrà:

$$v=\frac{ds}{dt}.$$

E lo stesso simbolo $\frac{ds}{dt}$ può significare ancora la velocità nel moto uniforme, stante che in questa specie di moto la relazione che uno spazio infinitesimo ha col tempo infinitesimo in cui è stato descritto, è la stessa che quella la quale ha luogo tra uno spazio finito qualunque ed il tempo durato a descriverlo.

11. Potremo in fine considerare il moto in quanto alla forza che lo produce. Una forza non ci è altrimenti nota, se non per mezzo della velocità che n'è l'effetto; da questo dovremo dunque arguire il valore di quella. Or si hanno parecchie funzio- Misura delle forze impulsive.

ni matematiche valevoli ad esprimere che la forza, come cagione, dev' essere più o meno grande a norma della velocità che n'è l'effetto: potremmo, a modo di esempio, supporre senza contraddizione che le forze sieno proporzionali alle potenze 2,e 3,e ecc. delle velocità, ovvero alle loro radici 2,e 3,e ecc. Ma questa stessa moltiplicità di funzioni matematiche, tutte egualmente ammisibili, è chiarissima pruova dell'impossibilità, in cui siamo, di definire *a priori* la vera relazione della velocità alla forza.

La quistione intanto era di sì grave interesse, che bisognava non lasciare intentato alcun mezzo di soluzione; e vi si è pienamente riuscito, comparando i risultamenti dell'osservazione alle conseguenze delle diverse ipotesi matematiche che si presentavano atte all'uopo. Così facendo si è trovato che la relazione della forza alla velocità, quale esiste nell'ordinamento del mondo fisico, è quella della semplice ragion diretta; dimodochè conosciamo come dato di osservazione, che una forza è doppia, tripla, ecc. allorchè produce in una stessa quantità di materia una velocità doppia, tripla, ecc.

Ed ove la quantità di materia sia diversa, avremo come necessaria conseguenza della sua inerzia, che la forza la quale produce la velocità v nell'unità di massa, dovrà divenire m volte maggiore per dare la stessa velocità v ad una massa m volte più grande. Quindi il valore f della forza che produce la velocità v nella massa m, sarà dato dall'equazione;

$$f = mv;$$

donde poi risultano le altre due:

$$v = \frac{f}{m}, \text{ ed } m = \frac{f}{v},$$

le quali servono a definire la velocità quando son date la forza e la massa, ovvero a determinare la massa nel caso che si conoscono la forza e la velocità.

Misura delle forze continue.

12. Ciò che nel numero precedente si è detto della misura delle forze, suppone che la loro trasfusione nei mobili siasi

del tutto compiuta. L'urto, per esempio, immette in un tempo estremamente piccolo una certa dose di forza nel corpo urtato, e quella dose vi rimarrebbe sempre la stessa, se delle resistenze non venissero a diminuirla: così ancora l'esplosione della polvere da sparo spinge continuamente il proiettile finchè questo rimane nella canna dell'arma, ma poi cessa di aggiungere nuovi conati, quando il proiettile n'è fuori. Or una forza, la quale può comunque trasfondersi in quantità determinata, dovrà necessariamente produrre una velocità crescente fino ad un certo limite; e questo valore finale della velocità moltiplicato per la massa del mobile darà la misura della forza.

Ma se la forza fosse di tal natura da non cessar giammai di aggiungere nuovi conati al mobile, allora la ragione alla velocità prodotta non avrebbe senso determinato, se non vi si facesse entrare la considerazione del tempo. Immaginiamo, a modo di esempio, un centro attraente che estenda indefinita la sua azione nello spazio, ed un corpo libero che la riceva; egli è chiaro che la celerità, prodotta nel corpo, sarà sempre crescente, finchè non giunga al luogo donde la forza si emana. In questa ipotesi, che vedremo realizzata nel moto dei gravi, è indispensabile che la ragione delle forze si riponga nella comparazione delle velocità acquistate in tempo eguali dall'origine del moto. Così dinotando con f ed f' due forze continue che in uno stesso tempo t producono in due masse eguali le velocità v e v', avremo:

$$f : f' = v : v'.$$

Or se l'azione della forza continua fosse sempre la stessa in tutto il cammino fatto dal mobile, egli è chiaro che la velocità prodotta avrebbe una ragion semplice diretta colla durata del moto; quindi se dopo il tempo t siasi ottenuta la velocità v, la velocità prodotta nel tempo 1 sarà stata $\frac{v}{t}$. E così le velocità generate in tempi qualunque diverranno comparabili per mezzo dei loro valori corrispondenti all'unità di tem-

po; quindi se v e v' sono le velocità prodotte in masse eguali dalle forze f ed f' durante i tempi t e t', avremo:

$$f : f' = \frac{v}{t} : \frac{v'}{t'}.$$

Laonde se prendiamo per unità di forza continua quella che nell'unità di massa produce l'unità di velocità nell'unità di tempo, avremo che la forza continua f, la quale ingenera nella stessa unità di massa la velocità v nel tempo t, sarà data dall'equazione:

$$f = \frac{v}{t}.$$

L'ipotesi di un'azione costante nelle forze continue si è ammessa a solo fine di rendere più agevole la ricerca della loro misura nel modo di agire che ad esse realmente si appartiene. Tutte le forze continue, che conosciamo, hanno un'azione varia lungo la via che il mobile n'è costretto a percorrere. Ma questa variabilità dovendo sparire nell'azione effettuita in un tempo infinitesimo, e per la quale azione la velocità del mobile è mutata ancor essa di un infinitesimo; ne segue che sostituendosi ai valori finiti di v e t i simboli dv e dt dei loro infinitesimi, l'equazione precedente, sotto la forma:

$$f = \frac{dv}{dt},$$

comprenderà in una sola espressione la misura delle forze continue sì variabili che costanti.

Azione e reazione. 13. Abbiamo veduto nel n° 3 come tutte le osservazioni concorrono a farci riguardare la materia come priva di qualsiasi tendenza tanto al moto che alla quiete; e quindi a considerare i corpi come non resistenti sia alle forze che tendono a metterli in moto, sia a quelle che tendono ad accrescere le velocità che essi già posseggono. Intanto se colla mano percuotiamo una palla in moto e nello stesso senso della linea che percorre,

ne riceveremo un urto analogo a quello che avremmo provato se avessimo opposta la mano al moto della palla. E se in questo secondo caso dobbiamo ammettere che l'urto sia effetto della forza donde la palla è animata, potremo poi far a meno di riguardare l'urto ricevuto nel primo caso come effetto della resistenza del mobile ad un incremento di velocità?

Per mostrare che questo fatto, anzichè contraddire all'idea d'inerzia, quale l'abbiamo presentata nel succitato numero, vi sia al contrario implicitamente contenuto, noi immaginiamo due palle A e B di qualsiasi sostanza molle, che si muovano per una stessa via, che la prima sia più celere della seconda, e che questa preceda l' altra. In conseguenza A verrà ad urtare B, e dopo l'urto le due palle per la mollezza della loro sostanza cammineranno unite insieme, ed avranno perciò una velocità comune. Indicando con m ed m' le masse di A e B, con v e v' le velocità che avevano prima dell' urto, e con v_1 quella che dopo avranno, sarà per le cose esposte nel n° 11:

$$v_1 = \frac{mv + m'v'}{m + m'}.$$

Quindi l'alterazione $v_1 - v$ avvenuta nella velocità di A sarà data dall'equazione:

$$v_1 - v = \frac{mv + m'v'}{m + m'} - v = -\frac{m'(v - v')}{m + m'},$$

e quella della velocità di B sarà:

$$v_1 - v' = \frac{mv + m'v'}{m + m'} - v' = \frac{m(v - v')}{m + m'}.$$

Or moltiplicando questi cangiamenti di velocità per le rispettive masse dei mobili, avremo le corrispondenti alterazioni di forze. Così nella palla A sarà avvenuta la mutazione di forza:

$$m(v_1 - v) = -\frac{mm'(v - v')}{m + m'},$$

e quella della forza B sarà:

$$m'(v_1 - v' = \frac{mm'(v - v')}{m + m'}.$$

E queste due espressioni, perchè eguali e di opposto segno, dimostrano che per mezzo dell'urto la forza di B si è di tanto accresciuta, di quanto è scemata quella di A.

Or la quantità di forza, che da A si è trasfusa in B, considerandola come un acquisto fatto da B, costituisce l'*azione di* A *su* B, e riguardandola come una perdita fatta da A, rappresenta la *reazione di* B *su* A. Quindi il principio:

All'azione è sempre compagna un'eguale ed opposta reazione.

Premesso ciò, poniamo di voler fermare una palla in moto, la quale pesa due chilogrammi e corre tre metri a minuto secondo. Essendo 2. 3 = 6 l'espressione della forza posseduta dalla palla, la mano dovrà opporle una forza eguale che nell'atto dell'urto sarà interamente assorbita dalla palla. Questa dunque, sottraendo la forza 6 dalla mano, vi produce quell'impeto che si sperimenta nell'urto.

Poniamo ora che mentre la stessa palla corre tre metri a secondo, noi raggiungendola colla mano la spingiamo in modo che la sua velocità salga a 6 metri a secondo, è chiaro che in questo caso la mano avrà comunicata alla palla una forza eguale a 6; o in altri termini la palla avrà sottratta dalla mano una forza eguale 6.

La mano avendo dunque patita eguale sottrazione di forza nei due casi, abbiamo dovuto provare un'identica sensazione. Ma la prima sottrazione ha servita a distruggere un'egual forza, mentre la seconda ha resa di altrettanto maggiore una forza già esistente; dunque l'identità della sensazione nei due casi non è pruova dell'attività dell'inerzia.

CAPO TERZO

COMPOSIZIONE DELLE FORZE AGENTI SOPRA UN MEDESIMO PUNTO.

Definizione della risultante.

14. Quando più forze agiscono simultaneamente sopra un punto materiale, questo non potendo seguire nel tempo stesso le varie direzioni per le quali è spinto dalle diverse forze, dovrà necessariamente seguire una certa via, e per essa muoversi con una certa velocità. Or questa via insieme alla velocità, colla quale è percorsa, definiscono in direzione e grandezza una forza, prodotta dal concorso delle forze date. Alla forza così prodotta, si è dato il nome di *risultante*; rispetto ad essa le forze date si dicono *componenti*; e la determinazione della risultante in funzione delle componenti costituisce il problema della *composizione delle forze*.

Di questo problema, che considerato in tutta la sua portata, costituisce come l'essenza della Meccanica razionale, noi ci faremo ad esaminare quei pochi casi, di cui occorrerà far menzione in questo trattato. E nell'esame di questi casi anzichè considerare le forze come speciali grandezze e toccare così tutta la generalità cui la Meccanica razionale è oggi pervenuta, noi preferiremo riguardarle soltanto pei loro effetti: imperocchè così facendo ci troveremo in una via più piana e meglio adatta al fine pel quale queste nozioni meccaniche vanno premesse alle teoriche di cui la Fisica realmente si compone.

Principio empirico della composizione delle forze.

15. Considerando le forze quali cagioni di moto, la legge della loro composizione risulta immediatamente dal dato sperimentale della mutua indipendenza dei loro effetti ; la quale sta in ciò che l'effetto di ciascuna forza si compie come se l'azione delle altre non esistesse. Ponendo, a modo di esempio,

che la terra fosse immobile nello spazio, allora un oriuolo a pendolo dovrebbe camminare con una velocità indipendente dalla posizione del piano verticale in cui andrebbero ad attuarsi le sue oscillazioni. Or l'osservazione dimostra che il moto dell'oriuolo è realmente indipendente dall'angolo che il piano di oscillazione del suo pendolo forma colla direzione del moto terrestre; il moto dell'oriuolo dunque si esegue, come se quello della terra non esistesse. Dicasi altrettanto del moto degli uomini, degli animali, dei carri a vapore, ecc. (1)

Parallelogrammo delle forze.

16. Posta la mutua indipendenza, di cui si è fatta parola, immaginiamo che un mobile A (fig. 2) percorra con moto uniforme la retta Ab, mentre questa serbandosi parallela a sè stessa, scorre equabilmente per la retta Ae. Essendo la velocità del mobile A, lungo la retta Ab, indipendente dal moto di questa, ne segue che compiendosi la 1ª terza parte della durata del moto, la retta Ab per aver fatto un terzo del suo cammino si troverà in ss', ed il mobile avrà percorsa la retta $st=\frac{1}{3}Ab$. Al termine del 2° terzo di tempo, Ab si troverà in vv' (supponendo che sia $Av=\frac{2}{3}Ae$), ed il mobile A avrà percorsa la $vo=\frac{2}{3}Ab$. Ed in fine, quando Ab verrà nella posizione ed, il mobile A si troverà in d.

(1) Dalla mutua indipendenza degli effetti delle forze risulta che se ad un corpo che si muove colla velocità v per effetto di una forza P, si comunichi nel senso del suo moto una forza P', che agendo sola vi avrebbe ingenerata la velocità v', la velocità risultante dall'unione delle due forze P e P' sarà $v+v'$. Or se le forze come cagioni debbono essere funzioni delle velocità che ne sono gli effetti, il dato sperimentale della mutua indipendenza delle loro azioni richiederà soddisfatta l'equazione:

$$f(v)+f(v')=f(v+v').$$

Ma è noto (Vedi i miei Elementi di algebra n° 373) che la natura della funzione, che può rendere soddisfatta l'equazione precedente è quella di essere un fattore costante; quindi dinotando questo fattore con k, avremo:

$$P=kv\ ,\quad P'=kv'\ ;$$

donde:

$$P:P'=v:v'.$$

Ed ecco come la proporzionalità delle forze alle velocità prodotte risulta dalla mutua indipendenza di queste. E nella mutua indipendenza, di cui parliamo, sta precisamente il dato sperimentale, di cui si è fatto cenno nel n° 11.

Or i punti A,*t*,*o*,*d* successivamente occupati dal mobile A, saranno in linea retta. Ed in vero i triangoli A*vo* ed A*st*, avendo l'angolo A*vo*=A*st* e compreso tra i lati A*v*=2A*s* ed *vo*=2*st*, saranno simili e perciò equiangoli ; ed in conseguenza avremo l'angolo *v*A*o*=*s*A*t*. Ma questi angoli hanno i lati A*v* ed A*s* sopra una stessa retta ; saranno dunque ancora per dritto i lati A*o* ed A*t*, e perciò i tre punti A,*t*,*o* saranno in linea retta. E nello stesso modo si dimostrerebbe che sulla retta dei punti A,*t*,*o* giace ancora il punto *d*.

Egli è chiaro che questa dimostrazione per nulla dipende dal numero di parti in cui si è divisa la durata del moto ; ed in conseguenza mentre la retta A*b* passa in *cd*, il mobile A che vi scorre sopra, descriverà realmente la retta A*d*, la quale (essendo *cd* eguale e parallela ad A*b*) sarà diagonale del parallelogrammo A*bdc*, costruito sulle due rette A*b* ed A*c*.

Ma le due rette A*b* ed A*c*, rappresentando due spazii uniformemente percorsi in tempi eguali, sono espressioni di due velocità, e quindi di due forze simultaneamente impresse al mobile A ; e la diagonale A*d* che il mobile percorre nel medesimo tempo, definisce in direzione e grandezza la loro risultante. Perciò:

Se due forze agiscono contemporaneamente sopra un punto materiale, esse si comporranno in una forza sola, rappresentata in grandezza e direzione dalla diagonale del parallelogrammo costruito sulle due rette che rappresentano le grandezze e direzioni delle forze date. (1)

(1) Qoesta dimostrazione del parallelogrammo delle forze, pregevole per essere di tutti la più elementare, ha noo pertanto il difetto di farci riguardare qnesto importante teorema come un corollario della proporzionalità delle forze alle velocità prodotte, mentre la Meccanica razionale ne sa dimostrare l'esistenza prescindendo da qualunque ipotesi sulla relazione della forza alla velocità.

È d'uopo purtuttavia osservare che se la scienza delle forze si è potuta unificare con quella dei moti, ciò è avvenuto perchè la relazione esistente in fatto tra le forze ed i loro effetti dinamici è quella di una semplice ragion geometrica ; in tutt'altra forma di relazione la cosa sarebbe andata diversamente. Ponendo, a modo di esempio, che le forze fossero proporzionali

Relazioni della risultante colle componenti.

17. Da questo teorema deriva che le relazioni di sito e grandezza tra le due componenti e la loro risultante saranno definite dalla situazione e grandezza dei lati di uno dei triangoli in cui la diagonale divide il parallelogrammo. Quindi:

— 1°. Indicando con P e Q (Fig. 2) le due forze Ab, Ac, e con θ l'angolo bAc sotto cui sono inclinate, avremo per un noto teorema geometrico:

$$R=\sqrt{P^2+Q^2+2PQ\cos\theta};$$

formola che dà il valore della risultante R in funzione dei valori delle componenti P e Q e dell'angolo θ sotto cui s'incontrano.

Dalla quale formola poi si rileva che facendo crescere l'angolo θ da 0° a 180°, la risultante dal valore $Q+P$ corrispondente a $\theta=0°$, andrà continuamente diminuendo fino a prendere il valore minimo $P-Q$, quando sarà $\theta=180°$; ossia che la risultante di due forze dirette nel medesimo senso pareggia la loro somma, e sarà invece eguale alla loro differenza

alle radici quadrate delle velocità, la risultante R di due forze P e Q inclinate sotto l'angolo θ, sarebbe tuttavia definita in valore dall'equazione:

$$R=\sqrt{P^2+Q^2+2PQ\cos\theta},$$

ed in direzione dall'altra:

$$sen\,\alpha=\frac{Q\,sen\,\theta}{\sqrt{P^2+Q^2+2PQ\cos\theta}},$$

α indicando l'angolo che la risultante fa colla componente P. Ma la velocità risultante V, come quella che deve corrispondere nella nostra ipotesi al quadrato della forza risultante, sarebbe data dall'equazione:

$$V=P^2+Q^2+2PQ\cos\theta.$$

Or se noi ci facessimo a determinare questa velocità risultante per mezzo del parallelogrammo delle velocità componenti, che sarebbero espresse da P^2 e Q^2, troveremmo:

$$V=\sqrt{P^4+Q^4+2P^2Q^2\cos\theta}.$$

Quindi, perchè il parallelogrammo delle forze nell'ipotesi adottata riuscisse simile a quello delle velocità, sarebbe necessario che l'equazione:

$$P^2+Q^2+2PQ\cos\theta=\sqrt{P^4+Q^4+2P^2Q^2\cos\theta}$$

rimanesse soddisfatta per valori qualunque di P, Q e θ; ciò ch'è impossibile.

se le componenti vanno dirette in senso opposto. E se in questo ultimo caso fosse P=Q, avremmo R=0; quindi il punto di applicazione delle due forze non concepirebbe moto alcuno. La quiete, prodotta dal contrasto di due forze eguali, si nomina *equilibrio*.

— 2°. Chiamando α e β gli angoli che la risultante fa colle componenti P e Q (Fig. 1), e considerando che i lati di ogni triangolo rettilineo sono come i seni degli angoli opposti, avremo le proporzioni:

$$P : R = sen\,\beta : sen\,\theta$$

$$Q : R = sen\,\alpha : sen\,\theta\,;$$

donde:

$$sen\,\alpha = \frac{Q\,sen\,\theta}{R}\,,\quad sen\,\beta = \frac{P\,sen\,\theta}{R}\,;$$

e per mezzo di questi valori si ha la definizione numerica della direzione della risultante.

— 3°. Se le due componenti P e Q sono eguali, il parallelogrammo *Acbe* (Fig. 3) risulterà un rombo, e la risultante, rappresentata dalla diagonale A*b*, bisecherà l'angolo d'inclinazione delle due componenti. Se poi le due componenti sono disuguali, e poniamo P>Q, allora nel triangolo ABC (Fig. 1) essendo AB>BC, sarà l'angolo ACB>BAC; ma è l'angolo ACB=DAC, sarà dunque $\beta > \alpha$; vale a dire che la risultante si approssima più alla componente maggiore.

18. Mediante il teorema del parallelogrammo è facile determinar graficamente la risultante di un numero qualunque di forze agenti sopra un punto materiale. Poniamo ad esempio che si voglia la risultante delle quattro forze p, p', p'', p''' concorrenti nel punto A (Fig. 8). Cominciando dal comporre per mezzo del parallelogrammo le due forze p e p', avremo l'espressione A*s* della loro risultante; componendo similmente A*s* con p'' otterremo A*t* come risultante delle tre forze p, p', p''; e finalmente dalla composizione di A*t* con p''' avremo la richiesta risultante AR delle quattro forze date. Poligono delle forze.

Or considerando la fig. 8 si vede che la retta AR, la quale rappresenta la risultante delle quattro forze date, non fa che chiudere il contorno poligonale ApstR; e che questo poteva determinarsi senza la successiva costruzione dei parallelogrammi $Apsp'$, $Astp''$, $AtRp'''$, imperocchè conducendo ps eguale e parallela ad Ap', indi st eguale e parallela ad Ap'', ed in fine tR eguale e parallela ad Ap''', il contorno ApstR sarebbe stato egualmente definito, e con esso lo sarebbe stata ancora la risultante AR. Donde si rileva che se il contorno poligonale si chiudesse pel fatto stesso della sua costruzione, si avrebbe la risultante $R=0$, e quindi le forze sarebbero in equilibrio.

Parallelepipedo delle forze.

19. Applichiamo ora il metodo del contorno poligonale alla determinazione grafica della risultante di tré forze che in piani differenti concorrono in un medesimo punto. Siano Ap, Ap',Ap'' (Fig. 4) le tre forze date. Conducendo pel punto p la pc eguale e parallela ad Ap', indi cR eguale e parallela ad Ap'', la congiungente AR sarà la risultante dimandata.

Ma se colle ottenute rette pc e cR formiamo il parallelogrammo psRc; colle rette Ap' ed Ap'', rispettivamente eguali e parallele a pc e cR, formiamo l'altro parallelogrammo $Ap'tp''$; ed in fine conduciamo cp',Rt ed sp'', avremo un parallelepipedo definito dalle tre forze Ap,Ap',Ap'', e la cui diagonale AR ne sarà la risultante. Perciò:

La risultante di tre forze, che in piani differenti concorrono in un medesimo punto, sarà definita in grandezza e direzione dalla diagonale del parallelepipedo costruito sulle tre rette che rappresentano le forze date.

Composizione delle forze continue.

20. Volendo applicare la legge del parallelogrammo alla composizione delle forze continue, farà d'uopo immaginarne l'azione trasformata in una serie d'impulsi successivi; e la risultante così ottenuta, divergerà tanto meno dalla sua vera grandezza e direzione, per quanta maggior frequenza si supporrà nella serie d'impulsi sostituiti alla continuità dell'azione. Consideriamo, a modo di esempio, il moto di un grave che sia spinto secondo AP (Fig. 11) mentre la gravità lo sollecita a scendere per la verticale Ag. Sostituiamo col pensie-

ro all'azione continua della gravità una serie d'impulsi eguali, ripetuti a piccolissimi intervalli di tempo, e ciascuno rappresentato da Ag; e sia AP il cammino che il mobile percorrerebbe in egual tempo, se non dovesse ubbidire ad altra forza che alla spinta ricevuta lungo la stessa linea. Nel primo intervallo di tempo il grave si troverà dunque sottoposto all' azione di due forze rappresentate da Ag ed AP, e dovrà perciò descrivere la diagonale As del corrispondente parallelogrammo. Giunto che sarà in s, la sua tendenza sarebbe quella di continuare a muoversi sulla stessa retta, descrivendo nel 2° intervallo di tempo lo spazio $st = As$; ma poichè nell' istante in cui il grave è giunto in s, la gravità ripete l'impulso $sv = Ag$, così sarà costretto a seguire la diagonale ss' del parallelogrammo costruito su st ed sv. E nello stesso modo camminerà successivamente per le diagonali $s's''$, $s''s'''$, ecc., nel 3° intervallo di tempo, nel 4°, ecc. A misura che quest'intervalli di tempo si faranno minori, più piccoli diverranno i lati del contorno poligonale $Ass's''$... e la via assegnata al grave più si avvicinerà a quella che realmente segue; e così vediamo la ragione di quelle curve, concave verso il suolo, e per le quali camminano i gravi, quando sono spinti in direzioni inclinate alla verticale.

21. Mercè lo stesso teorema del parallelogrammo potremo ancora risolvere il problema inverso, cioè decomporre una forza data in altre di cui essa sia la risultante. Poniamo in primo luogo che la forza data e le sue componenti debbano essere in un medesimo piano. In questo caso il problema cesserebbe di esser determinato, se si cercassero più di due componenti e se di queste non fossero note le intensità o le direzioni. Decomposizione di una forza in altre.

Supponiamo primieramente che la forza P, rappresentata in grandezza e direzione dalla retta Ac (Fig. 5) si voglia decomporre in due altre dirette secondo Av ed Ax. Per definire i valori di queste due componenti, si conducano dal punto c le due rette cb e ce rispettivamente parallele ad Av ed Ax: avremo così definito il parallelogrammo $Aecb$, e la forza P sarà divenuta risultante di Ae ed Ab.

Se poi fossero noti i valori Ae, Ab delle due componenti, e

se ne volessero le direzioni, allora dagli estremi A e c della retta che rappresenta la forza P, si descriverebbero due archi di cerchio coi raggi Ae ed Ab: dall'intersezione di questi archi resterebbe definito il triangolo Abc, e le due rette, ce parallela ad Ab ed Ae parallela a cb, completerebbero il parallelogrammo.

Ponendo in fine che una delle componenti, la Ab, fosse data in grandezza e direzione, basterebbe condurre la cb e completare il parallelogrammo, perchè rimanesse interamente definita l'altra componente Ae.

E questi tre problemi si avrebbero facilmente risoluti in numeri, qualora si facesse uso dei simboli trigonometrici. Il caso di componenti inclinate ad angolo retto essendo quello che più spesso incontreremo in questo trattatò, noi facciamo osservare che ponendo $=90°$ l'angolo BAD (Fig. 7) formato dalle due componenti AB,AD; e chiamando α l'angolo che la risultante AC fa colla componente AD, si hanno le due equazioni:

$$AD = AC . \cos\alpha \ , \quad AB = AC . \operatorname{sen}\alpha \ ,$$

sufficienti alla risoluzione dei tre suindicati problemi.

Passiamo ora a considerare le componenti di una data forza AR (Fig. 4) come giacenti nello spazio che circonda il suo punto di applicazione. In questo caso non potremo supporre che tre componenti, essendochè un numero maggiore renderebbe il problema indeterminato, e l'ipotesi di due componenti ci menerebbe a dover riguardare la risultante nello stesso loro piano. Avremo dunque a considerare la forza data come diagonale di un parallelepipedo le cui costole sono ignote per grandezza o per direzione. Ponendo, com'è di ordinario, che le direzioni delle componenti sieno date, ne avremo i valori conducendo per l'estremità R della retta, che rappresenta la forza data, tre piani rispettivamente paralleli a quelli che contengono a due a due le tre direzioni date, Ax, Ay, Az. Avremo così le tre intersezioni p, p', p'', e quindi le tre componenti Ap, Ap', Ap''; le quali, nel caso che le direzioni date sieno rettangolari, saranno numericamente espresse da $R\cos\alpha$, $R\cos\beta$, $R\cos\gamma$, α, β, γ indicando gli angoli che esse formano colla risultante R.

CAPO QUARTO.

COMPOSIZIONE DELLE FORZE PARALLELE.

22. Sieno P e Q (Fig. 13) due forze parallele agenti su i punti *a* e *b* invariabilmente uniti. Per applicare a questo caso il principio del parallelogrammo introduciamo le due forze eguali ed opposte, *am* e *bn*, le quali distruggendosi a vicenda, lasciano inalterata l'azione delle forze P e Q. Così la risultante di queste due forze sarà identica a quella delle quattro forze *am*,P,Q,*bn*. Ma P ed *am* hanno una risultante rappresentata dalla diagonale *ac*, e quella di Q e *bn* lo è dalla diagonale *bd*; la risultante di P e Q sarà dunque identica a quella di *ac* e *bd*. Or le direzioni di queste due forze, a sufficienza prolungate, dovranno incontrarsi in un qualche punto K; e poichè ogni forza può considerarsi applicata ad un punto qualunque della sua direzione, purchè sia invariabilmente unito a quello su cui la forza realmente agisce, così potremo riguardare la forza *ac* come trasportata in K*g*, e la *bd* in K*v*. Quindi la diagonale K*z* del parallelogrammo costruito sulle rette K*g* ed K*v*, rappresenterà la risultante delle forze *ac* e *bd*, ed in conseguenza di P e Q.

Risultante di due forze parallele dirette in un medesimo senso.

Or per definire la K*z* in funzione delle quantità date, conduciamo la *gt* eguale e parallela ad *am*, e congiungiamo i punti K e *t*: sarà il triangolo P*ac* eguale al triangolo *t*K*g*, e quindi l'angolo P*ac*=*t*K*g*. Ma, come è facile a vedersi, è l'angolo *a*K*b*=P*ac*+Q*bd*; sarà dunque l'angolo Q*bd*=*t*K*v*, ed in conseguenza la *vs*, menata parallela ad *ab* e prolungata fino ad incontrare la K*t*, risulterà eguale alla *gt*. Il punto *t* cadrà dunque sulla diagonale K*z*; e poichè la K*t* è parallela alle direzioni di P e Q, tale sarà ancora la K*z*. In conseguenza: *la risultante di due forze parallele e dirette in un medesimo senso, è parallela alla loro comune direzione.*

Inoltre dall' essere il triangolo $gKt=aPc$ ed il triangolo $Ksv=bQd$, risulta $Kt=P$ ed $Ks=Q$; ma è ancora $Kt=sz$, sarà dunque $Kz=Kt+Ks=P+Q$. E perciò: *la risultante di due forze parallele dirette in un medesimo senso pareggia la loro somma.*

Non rimane dunque, per definire interamente la richiesta risultante, che a cercare un punto qualunque della sua direzione, e sia il punto o in cui essa incontra la congiungente ab dei punti di applicazione delle componenti. Abbiamo all'uopo i triangoli simili gKt ed aKo, vKs e bKo, che ci somministrano le proporzioni:

$$ao : Ko = gt : P\,,$$

$$bo : Ko = vs : Q\,;$$

donde: $$P\,.\,ao = Ko\,.\,gt\,,\quad Q\,.\,bo = Ko\,.\,vs$$

Ma è $gt=vs$; sarà dunque:

$$P\,.\,ao = Q\,.\,bo\,,\ \text{ossia}\ ao : bo = Q : P.$$

Vale a dire che: *la risultante di due forze parallele dirette nello stesso senso, divide la congiungente i punti di applicazione in parti reciprocamente proporzionali alle intensità delle forze.*

Or fa d'uopo osservare che la proporzione, la quale definisce il luogo del punto o, lo mostra dipendente soltanto dall'intervallo dei punti di applicazione e dai valori delle forze P e Q; dimodochè se queste forze, conservandosi parallele, girassero su i punti a e b, la loro risultante girerebbe sul punto o. Quindi è che questo punto si è denominato *centro* delle due forze.

Risultante di due forze parallele ed opposte. Caso della coppia.

23. Passiamo a considerare il caso di due forze parallele, P e Q (*fig.* 6) che in opposte direzioni agiscono su i punti estremi della retta ab. Ponendo che sia $P>Q$, potremo riguardare P come risultante delle due forze, $Q'=Q$ ed $R=P-Q'$, ad essa parallele e dirette nel medesimo suo senso. Avremo così che il sistema delle tre forze parallele Q, Q' ed R sarà equivalente a quello di P e Q. Ma Q e Q', come eguali e direttamente oppo-

ste, si distruggono a vicenda; resterà dunque la sola forza **R** come equivalente all'azione unita di **P** e **Q**, o in altri termini sarà **R** la risultante di **P** e **Q**. Perciò:

La risultante di due forze parallele ed opposte è eguale alla loro differenza ed agisce nel senso della componente maggiore.

Per definire poi il punto, cui sarà applicata, avremo (essendo **P** risultante di **Q'** ed **R**) la proporzione:

$$bc : ab = Q' : R \, ;$$

quindi:
$$bc = \frac{Q'.ab}{R} = \frac{Q.ab}{P-Q}.$$

E da quest'ultima formola si rileva che la risultante di due forze parallele ed opposte si allontanerà vieppiù dalle componenti, come sarà minore la loro differenza; dimodochè la sua distanza diverrà infinita, quando le componenti saranno eguali. Nella stessa ipotesi sarà $R = 0$; e poichè questa relazione non può essere l'espressione di un equilibrio, evidentemente impossibile, è chiaro che le due forze non potranno comporsi in una sola. Questo speciale sistema di due forze parallele si denomina *coppia*.

Risultante di un sistema di forze parallele.

24. Dal caso di due forze parallele egli è facile passare a quello di un numero qualunque di queste forze. Poniamo in primo luogo che esse, come **P**,**P'**,**P''** (Fig. 14) vadano tutte dirette in un medesimo senso. Allora dividendo l'intervallo *ab* dei punti di applicazione delle forze **P** e **P'** in parti reciprocamente proporzionali alle intensità di queste forze, si avrà il punto *c* di applicazione della loro risultante $P+P'$; e ripetendo la stessa operazione sulla retta *cd* che congiunge i punti di applicazione delle forze $P+P'$ e P'', si otterrà il punto *g* di applicazione della risultante $P+P'+P''$ delle tre forze date. Nello stesso modo si continuerebbe l'operazione nel caso di un maggior numero di forze.

Se poi delle date forze parallele alcune siano dirette in un senso ed altre in senso opposto, allora determinate le risultanti parziali R_1 ed R_2 dei due gruppi di forze che distinguia-

mo colle lettere P e Q, si avrà per le cose anzidette:

$$R_1 = P + P' + P'' + \ldots, \quad R_2 = Q + Q' + Q'' + \ldots$$

Quindi il problema si ridurrà a dover determinare la risultante delle due forze parallele ed opposte R_1 ed R_2. Le quali, se eguali, ci chiariranno che il sistema delle forze date è realmente una coppia; e se diseguali, ne avremo la risultante nella differenza:

$$R_1 - R_2 = P + P' + P'' + \ldots - Q - Q' - Q'' - \ldots$$

Donde si rileva che la risultante di un sistema di quante forze parallele si vogliano, sarà sempre espressa dalla loro somma algebrica.

Centro di un sistema di forze parallele.

25. Eccetto il caso di una coppia che sappiamo (n° 23) irriducibile ad unica forza, la costruzione stessa del punto di applicazione della risultante di un sistema di forze parallele dimostra che quel punto gode della proprietà, già fatta osservare nel n° 22 pel caso di due sole forze, che la sua posizione rimane invariata comunque le forze girino intorno ai loro punti di applicazione, senza cessar giammai di esser parallele.

Ogni sistema dunque di forze parallele, riducibile ad unica risultante, ammette un *centro*.

CAPO QUINTO.

MOMENTI DELLE FORZE.

26. Immaginiamo una linea rigida *cb* (Fig. 9) perpendicolare ad un asse proiettato in *c*, intorno al quale sia mobile; e supponiamo che all'estremo *b* della linea ed in un piano perpendicolare all'asse sia applicata la forza P. Decomponendo questa forza nelle due, *bp* perpendicolare alla *cb* e *bs* nel prolungamento di essa, è chiaro che la sola componente *bp* tenderà a produrre rotazione intorno all'asse *c*, mentre la componente *bs* spingerà l'asse a muoversi parallelamente a se stesso. Quindi per ottenere il maggior effetto utile dell'azione rotatoria della forza P, è d'uopo che sia diretta perpendicolarmente a *cb*. Definizione del momento di una forza.

Che se poi la forza P (Fig. 42) giacesse in un piano obbliquo all' asse di rotazione *ab*, allora la decomporremo in due altre, l'una secondo *dh* parallela ad *ab*, l'altra secondo l'intersezione *dg* del piano P*dh* col piano *cdg* menato pel punto di applicazione *d* normalmente all'asse *ab*. Egli è chiaro che la sola componente *dg* sarà efficace a produrre rotazione intorno ad *ab*; imperocchè immaginando che al punto *c* di questo asse e secondo la sua lunghezza siano applicate le due forze *cm*, *cm'* tra loro opposte ed eguali alla componente *dh*, avremo che questa sarà equivalente all'azione della forza *cm*, che spinge l'asse nel senso della sua lunghezza, ed a quella della coppia *dh*,*cm'* che tende a rimuoverlo nel senso in cui essa andrebbe a svolgersi.

Premesso ciò, supponiamo che ai punti estremi della linea rigida *ab* (Fig.10) mobile intorno all'asse *c* siano applicate nel modo anzidetto le due forze P e Q, tali da rendere soddisfatta la proporzione (n° 22)

$$P : Q = bc : ac.$$

È chiaro che dietro queste condizioni la linea *ab* rimarrà in equilibrio, poichè la risultante delle due forze P e Q passerà pel punto *c*, ed ivi sarà distrutta dalla resistenza dell'asse, che supponiamo sufficiente.

Or immaginiamo che alla forza Q se ne voglia sostituire un'altra Q', similmente diretta ed applicata al punto *b'*, medio dell'intervallo *cb*; e che la sua energia sia tale che componendosi colla forza P, la loro risultante passi ancora pel punto *c*. Dalla proporzione:

$$Q' : P = ac : cb'$$

abbiamo:
$$Q' = \frac{P \, . \, ac}{cb'},$$

mentre dalla proporzione precedente si ha:

$$Q = \frac{P \, . \, ac}{cb}.$$

Sarà dunque:

$$Q' : Q = \frac{1}{cb'} : \frac{1}{cb} = 2 : 1 ;$$

vale a dire che Q' dovrà essere doppia di Q, perchè la risultante di P e Q' passi ancora pel punto *c*.

Da ciò si rileva — 1° Che gli effetti rotatorii delle forze Q e Q' sono eguali tra loro, perchè entrambi fanno equilibrio all'opposta rotazione cui tende a produrre la forza P. — 2° Che la distanza della direzione di una forza dall' asse di rotazione influisce sulla quantità dell'effetto che essa tende a produrre — 3° Che questa influenza è di tal natura che per conservare inalterata l'azione rotatoria, bisognerà duplicare, triplicare, ecc. la grandezza della forza, quando la sua distanza dall' asse sia ridotta a metà, terza parte, ecc.

Or non essendovi che la sola funzione *prodotto*, la quale ab-

bia la proprietà di rimanere inalterata, quando uno dei suoi elementi diviene doppio, triplo, ecc. mentre l'altro è ridotto a metà, terza parte, ecc.; è chiaro che la grandezza dell'azione rotatoria di una forza dovrà esser rappresentata dal prodotto dell'intensità della forza per la sua distanza dall'asse di rotazione. Questo prodotto si nomina *momento*.

Momento della risultante in funzione delle componenti.

27. Quando più forze tendono a far rotare il sistema dei loro punti di applicazione intorno ad un dato asse, l'effetto della loro tendenza sarà misurato dal momento della loro risultante. Or questo momento ha relazione semplicissima coi momenti delle forze componenti. Poniamo che il piano delle due forze AB ed AD (Fig. 12) sia mobile intorno ad un asse proiettato in O. Costruito il parallelogrammo ABCD, e condotte le perpendicolari Ov, Os, Ot sulle direzioni delle forze AB, AD e della loro risultante AC, saranno $AB \times Ov$, $AD \times Os$ ed $AC \times Ot$ i rispettivi momenti. Condotta la AO prolungata in x, e le perpendicolari BE, DG e CH, avremo pei triangoli simili ABE ed AOv la proporzione:

$$AB : AO = BE : Ov$$

donde:

$$BE = \frac{AB . Ov}{AO}.$$

E similmente dalle proporzioni:

$$AD : AO = DG : Os$$

$$AC : AO = CH : Ot,$$

le quali hanno luogo nei triangoli simili ADG ed AOs, ACH ed AOt, avremo:

$$DG = \frac{AD . Os}{AO}, \quad CH = \frac{AC . Ot}{AO}.$$

Or conducendo DF parallela ad Ax si vede essere DG=FH, e pei due triangoli ABE e DCF sarà BE=CF; quindi si avrà:

$$CH = BE + DG\ ;$$

e sostituendo in questa equazione i valori di CH, BE e DG di sopra trovati, si avrà:

$$AC.Ot = AB.Ov + AD.Os\ ;$$

vale a dire che: *il momento della risultante pareggia la somma dei momenti delle componenti.*

Questa dimostrazione suppone il punto O fuori dell'angolo formato dalle due componenti. Poniamo in vece che ne fosse dentro, come nella fig. 16 ; ed allora sarà:

$$CH = BE - DG\ ,$$

ed in conseguenza:

$$AC.Ot = AB.Ov - AD.Os\ ;$$

vale a dire che il momento della risultante sarà eguale alla differenza dei momenti delle componenti.

Or considerando che le due componenti tendono a produrre rotazioni cospiranti ovvero opposte, secondochè il centro di esse rotazioni giace fuori o dentro dell'angolo formato dalle componenti, potremo comprendere i due teoremi nello stesso enunciato, dicendo che:

Il momento della risultante di due forze concorrenti in un punto pareggia la somma algebrica dei momenti delle componenti.

Caso delle forze parallele.

28. Lo stesso teorema reggerà ancora rispetto a due forze parallele. Imperocchè , supponendo che P e P′ (Fig 21) sieno due forze parallele, le quali agiscano normalmente sulla retta ab mobile intorno ad un asse proiettato in a , avremo il punto e di applicazione della loro risultante mercè la proporzione (n° 22):

$$P : P' = ce : eb = ae - ac : ab - ae\ ;$$

dalla quale risulta l'equazione:

$$P\ .\ ab + P'\ .\ ac = (P + P')\ .\ ae.$$

Ma $P.ab$ e $P'.ac$ esprimono i momenti delle componenti, e $(P+P').ae = R.ae$ è quello della loro risultante; dunque questo pareggia la somma dei primi.

Procedendo allo stesso modo rispetto alle forze P e P' (Fig. 15) che tendono a produrre opposte rotazioni, si troverà:

$$P.ab - P'.ac = R.ae,$$

ossia che il momento della risultante R è eguale alla differenza dei momenti delle componenti P e P'.

Ed in generale, sempre che un sistema di qualsiasi numero di forze, e comunque dirette nello spazio, sia riducibile ad unica risultante, si avrà che il momento di questa pareggerà la somma algebrica dei momenti delle componenti.

29. Il momento di una coppia, che sappiamo (nº 23) irreducibile a forza unica, non può esser compreso nei casi precedenti che suppongono l'esistenza di una risultante. A fine di definirlo immaginiamo il piano della coppia P,—P, (Fig. 22) mobile intorno ad un asse condotto per un punto qualunque a di esso piano: per questo punto s'intenda menata la ab perpendicolare alle direzioni delle componenti, e tolta la ad eguale al loro intervallo bc, si ponga applicata in d una forza P_1 eguale e parallela alle P ed agente nel senso della componente prossima all'asse di rotazione. Le due forze P agenti in un medesimo senso daranno una risultante 2P applicata al punto medio e del loro intervallo dc; e così il sistema delle tre forze P, P_1 e —P si riduce a quello delle due forze 2P e —P. Le quali, perchè parallele diseguali ed opposte, ammettono un centro definito della proporzione (nº 22): Momento di una coppia.

$$x : ab = (-P) : 2P = 1 : 2.$$

Sarà dunque $x = \frac{1}{2}(ab) = ea$; e perciò la risultante delle due forze 2P e —P passerà pel punto fisso a, e non potrà produrre rotazione del piano intorno a questo punto. Vi è dunque equilibrio tra il momento della forza P_1 e l'azione della coppia P_1,—P; e perciò quest'azione consiste in una tendenza a produrre rotazione. Ma il momento della forza P_1 è misurato da $P_1.ad$ e.

spinge da sinistra a dritta , quello della coppia sarà dunque espresso da $P.bc = P_1.ad$ ed agirà da destra a sinistra; vale a dire nello stesso senso in cui la coppia tende a porre per dritto le sue componenti. Le coppie dunque tendono a produrre moto di rotazione con un momento , misurato dal prodotto di una delle componenti per la sua distanza dall'altra, ossia pel *braccio di leva* della coppia.

Da ciò si rileva che il momento di una coppia sarà lo stesso per ogni punto del suo piano ; e che il suo valore resterà invariato, se accrescendo o diminuendo secondo una ragione qualunque il braccio di leva della coppia, si diminuisca viceversa o si accresca secondo la stessa ragione il valore di ciascuna componente.

LIBRO SECONDO.

TEORIA DELLA GRAVITA

CAPO PRIMO.

DIREZIONE DELLA GRAVITÀ E SUA PROPORZIONALITÀ ALLA MASSA.

30. Ogni corpo, allontanato dal suolo, vi ritorna quando sia abbandonato a se stesso. Esiste dunque una forza che spinge verso la terra tutti i corpi che si trovano nella sua sfera di azione: a questa forza si è dato il nome di *gravità*. Definizione.

31. La linea, in cui la gravità spinge un corpo a cadere verso il suolo, è perpendicolare alla superficie delle acque stagnanti nel luogo della caduta.

Per dimostrare la verità di questa proposizione fa d'uopo premettere la seguente legge relativa alla produzione delle immagini per opera degli specchi piani — Rappresenti AB(Fig.18) la superficie di uno specchio piano, ed m sia un punto luminoso; conducendo la mz perpendicolare al piano dello specchio, e prolungandola di altrettanto in m', avremo in questo estremo della perpendicolare il luogo occupato dall'immagine del punto m. Or se questa costruzione si applichi ai diversi punti dell'oggetto ab (Fig. 24) che supponiamo situato avanti allo specchio piano CB, troveremo che l'oggetto ab e la sua immagine $a'b'$ sono due figure eguali, simmetricamente situate rispetto al piano dello specchio ; e che in conseguenza se l'oggetto ab, girando intorno al punto b, venga a collocarsi in kb perpendicolarmente al piano dello specchio, la sua immagine $a'b'$ seguirà lo stesso Direzione della gravità.

movimento e verrà a situarsi in $k'b'$ sul prolungamento della stessa perpendicolare.

Premessa questa legge della riverberazione lucida, legge che dichiareremo nel Libro VI di quest'opera, facciamoci ad attuare il seguente sperimento. Ad un piombino *ab* (Fig. 17) sospeso ad un punto fisso sottoponiamo una vasca piena di mercurio, che ci offrirà un ottimo specchio piano nella sua superficie di livello; indi prendiamo un altro piombino *mn* ed avvicinatolo all'occhio in modo che ne resti impedita la vista del filo *ab*, troveremo che ne verrà occultata ancora la immagine $a'b'$ riverberata dalla superficie del mercurio: il filo *ab* dunque e la sua immagine $a'b'$ saranno in un medesimo piano. Girando intorno alla vasca, facciamoci a ripetere lo stesso sperimento in una seconda stazione, ed ivi troveremo ancora che quando per l'interposizione del filo *mn* sia impedita la vista del filo *ab*, lo sarà del pari quella dell'immagine $a'b'$, e che in conseguenza giaceranno entrambi in un secondo piano. Avremo così due piani, in cui *ab* ad $a'b'$ dovranno trovarsi nel tempo stesso; la vera loro giacitura sarà dunque nella retta d'intersezione dei due piani. Or per essere $a'b'$ sul prolungamento di *ab*, questo filo dovrà esser perpendicolare al piano di livello del mercurio; e poichè nella linea di un piombino è disegnata la direzione della gravità, questa direzione è dunque perpendicolare alla superficie delle acque tranquille nel luogo dell'esperimento; vale a dire che essa si confonde colla verticale del luogo occupato dal grave.

Parallelismo della gravità nelle piccole distanze. Centro di gravità.

32. Essendo la gravità diretta perpendicolarmente alla superficie dei liquidi stagnanti, la sua direzione sarà ovunque normale alla superficie del mare, ed in conseguenza a quella del nostro pianeta. Il quale avendo forma presso che sferica, come risulta da tutte le ricerche eseguite per definirne la figura, dovrà avere le normali ai diversi punti della sua superficie ben poco divergenti dai rispettivi raggi; e perciò potremo riguardare come un dato abbastanza esatto che la direzione del filo a piombo coincida in generale con quella del raggio terrestre, e che in conseguenza la gravità spinga i corpi verso il centro della terra.

E dalla coincidenza della direzione della gravità col raggio terrestro risulta che due fili a piombo situati in luoghi diversi saranno inclinati tra loro sotto un angolo misurato dall'arco di cerchio massimo che vi è interposto. Quindi, stando alla definizione del metro, i due fili dovranno esser lontani $30^{m},86$ per formare l'angolo di $1''$; e perciò in distanze minori potremo riguardare la gravità come agente per direzioni parallele.

Combinando questo principio col fatto che le parti di uno stesso corpo hanno un peso che varia in ragion diretta del loro volume, e che in conseguenza la forza di gravità agisce sulle singole particelle dei corpi; ne vedremo sorgere il concetto che i corpi, in quanto che sono gravi, possono riguardarsi come sistemi di punti materiali animati da forze parallele dirette in un medesimo senso.

Or simili sistemi di forze ammettono sempre un centro (n° 25) vale a dire un punto per cui passerà costantemente la risultante del sistema, comunque le forze sieno inclinate alle congiungenti i loro punti di applicazione. Per ogni corpo dunque vi sarà un *centro di gravità*, vale a dire un punto a cui potremo riguardare applicata una forza eguale al suo peso e verticalmente diretta dall'alto in basso.

Proporzionalità della gravità alla massa.

33. È noto (n° 11) che la grandezza di una forza si desume dal prodotto della massa per la velocità del mobile, e che in conseguenza due forze seguiranno o pur no la ragione delle masse a cui sono applicate, secondochè i movimenti prodotti avranno velocità eguali o differenti. Quindi per conoscere se la gravità sia eguale o diseguale nelle minime particelle di materia, fa d'uopo osservare se corpi diversi per natura e peso scendano da eguali altezze con velocità identica o diversa. Questo decisivo esperimento è stato per la prima volta ideato ed effettuito da Galilei, mentre studiava Filosofia nell'Università di Pisa. Dall'alto della torre di quella città egli fece cadere diversi globetti, di oro, di piombo, di rame, di porfido e di cera, e si vide che il solo globetto di cera tardava alquanto a raggiungere il suolo, mentre gli altri lo incontravano presso che simultaneamente. Galilei attribuì il ritardo osservato nel globetto di

cera alla maggior perdita di velocità patita da questo corpo per causa della resistenza dell'aria ; spiegazione più tardi verificata, quando inventata la macchina pneumatica e lasciati cadere in un tubo voto di aria un fiocchetto di lana ed un pezzo metallico, si vide che i due corpi cadevano colla stessa velocità. [1]

La gravità agisce dunque colla stessa energia sopra gli atomi di tutti i corpi, e se non fosse la resistenza dell'aria i corpi più leggieri ed i più pesanti cadrebbero con eguali velocità. Laonde le due espressioni sovente adoperate — *La gravità è la stessa in tutti i corpi* — *La gravità è proporzionale alle masse dei corpi* — sono tutte due esatte, se colla prima intendasi dinotare la dose di gravità posseduta da ciascun atomo, e colla seconda la risultante delle gravità atomiche.

Determinazione dei centri di gravità

34. Il principio di una gravità identica in tutti gli atomi della materia rende agevole la ricerca dei centri di gravità dei corpi. Limitandoci ai casi più semplici, ci faremo primieramente a determinare il centro di gravità di un triangolo, un parallelogrammo, un trapezio, supponendo che dei corpi fisicamente omogenei e ridotti a falde piane sottilissime, avessero una di queste tre forme.

Sia ABC (Fig. 37) il triangolo proposto. Immaginandolo diviso in elementi rettilinei, come hl, paralleli al lato AC, ciascuno di essi avrà il suo centro di gravità nel punto medio della sua lunghezza; e poichè tutti questi punti stanno su la Bm che

[1] Ammesso che la gravità agisca egualmente su tutti gli atomi della materia, egli è facile dimostrare che nei mezzi resistenti ed a dati eguali un corpo più leggiero dovrà soffrire maggior perdita di velocità di un corpo più pesante. Ed in vero, ponendo che le figure dei due corpi sieno eguali, egli è chiaro che essi incontreranno eguali resistenze percorrendo uno stesso mezzo colla medesima velocità ; e perciò se chiamiamo m ed m' le masse dei due corpi, ossia i numeri di atomi in essi contenuti (numeri proporzionali ai pesi dei due corpi nell'ipotesi di una stessa gravità atomica) ed indichiamo con r la resistenza comune, avremo che le perdite di forza e quindi di velocità sofferte dai singoli atomi dei due corpi, saranno rispettivamente rappresentate da $\frac{r}{m}$ ed $\frac{r}{m'}$; quindi nell'ipotesi di $m<m'$, sarà $\frac{r}{m}>\frac{r}{m'}$, ossia che sarà maggiore la perdita di velocità del corpo più leggiero.

unisce il vertice B col punto medio m del lato AC, sulla stessa Bm dovrà trovarsi il centro di gravità dell'intero triangolo. Per la stessa ragione il centro richiesto dovrà giacere ancora su la Cn che congiunge il vertice C col punto medio n dell'opposto lato AB ; starà dunque nel punto o d'intersezione delle due rette Bm e Cn. Or congiungendo i punti m ed n, la retta mn, dividendo i lati AB ed AC in parti proporzionali, sarà parallela al lato BC ; quindi risulteranno simili i due triangoli mno e BoC, e ci daranno la proporzione:

$$Bo : om = BC : mn.$$

Ma i due triangoli simili ABC ed Amn ci danno l'altra proporzione:

$$BC : mn = AC : Am = 2 : 1 ;$$

dunque sarà:

$$Bo : om = 2 : 1.$$

Quindi si ha $Bo = \frac{2}{3} Bm$; vale a dire che: *il centro di gravità di un triangolo si trova ai $\frac{2}{3}$ della congiungente uno qualunque dei suoi vertici col punto medio del lato opposto.*

In forza dello stesso principio il centro di gravità del parallelogrammo ABCD (Fig. 33) dovrà trovarsi sulle rette mn ed st che congiungono i punti medii dei lati opposti, e quindi nella loro intersezione o. Ma conducendo le due diagonali AC, BD, i triangoli simili BDC ed oDt, ABC ed oCn ci dimostrano che il punto d'intersezione o di mn e ts si confonde col punto d'intersezione delle due diagonali; in questo punto starà dunque il centro di gravità del parallelogrammo.

Immaginando allo stesso modo diviso il trapezio ABCD (Fig. 44) in elementi rettilinei paralleli alle basi AD, BC, troveremo che il suo centro di gravità dovrà giacere sulla mn che congiunge i punti medii di esse basi. Ma diviso il trapezio nei due triangoli ABD, BCD, e determinati i loro centri di gravità g e g', il centro richiesto dovrà stare ancora sulla gg'; starà dunque nella intersezione o delle due rette gg' ed mn. E per definirne la sua distanza mo dalla base BC, conducia-

mo gs e $g't$ parallele a BC; e così, fatta $mn=a$, avremo $mt=ts=sn=\frac{1}{3}a$. Or ponendo $to=x$, ed in conseguenza $os=\frac{1}{3}a-x$, i due triangoli simili gos ed otg' ci daranno la proporzione:

$$to:os=og':og \text{ ossia } x:\tfrac{1}{3}a-x=og':og.$$

Ma se in o è il centro di gravità del sistema dei due triangoli ABD, BCD, la gg' resterà in o divisa in parti reciprocamente proporzionali alle aje dei due triangoli (n° 22); e perciò indicandone con $2p$ e $2q$ le basi BC e AD, avremo:

$$og':og=q:p\,,$$

ed in conseguenza:

$$x:\tfrac{1}{3}a-x=q:p\,,$$

donde:
$$x=\frac{aq}{3(p+q)}.$$

Ed in fine aggiungendo a questo valore quello di $mt=\frac{1}{3}a$, avremo:

$$mo=\tfrac{1}{3}a\frac{p+2q}{p+q}.$$

Ciò posto, si potrà determinare la posizione del centro o per mezzo di una semplicissima costruzione. Si prolunghi la base BC di $CL=2q$, e la base DA di $AK=2p$: l'intersezione della congiungente KL con mn darà il centro richiesto. Ed in vero ponendo $mo=y$, ed in conseguenza $on=a-y$, i due triangoli simili oLm, oKn ci daranno la proporzione:

$$om:on=Lm:Kn,$$

ossia:
$$y:a-y=p+2q:q+2p\,;$$

donde:
$$y=\tfrac{1}{3}a\frac{p+2q}{p+q}\,,$$

ch'è precisamente il valore di mo sopra trovato.

Facendoci in fine a determinare il centro di gravità di una piramide, cominciamo dal caso di una piramide triangolare. Sia ABCD (Fig. 38) la piramide proposta. Unendone il vertice A col centro di gravità o della sua base, la congiungente Ao passerà pei centri di gravità di tutte le sezioni fatte da piani paralleli alla base. Ed in vero, sia stv una di queste sezioni: il piano condotto pei vertici A e D, e pel punto medio m del lato BC, conterrà la Ao, taglierà il triangolo stv secondo vz e ne bisecherà il lato st nel punto z. Sulla vz giacerà dunque il centro di gravità del triangolo stv. Ma i triangoli simili ADm ed Avz,ADo ed Avl ci danno le proporzioni:

$$AD : Av = Dm : vz,$$

$$AD : Av = Do : vl ;$$

donde: $$Dm : Do = vz : vl ;$$

dunque se $Do = \frac{2}{3} Dm$, sarà $vl = \frac{2}{3} vz$; ed il centro di gravità del triangolo stv giacerà sulla Ao.

Laonde se immaginiamo la piramide divisa in falde parallele alla base BCD, i centri di gravità di tutte le falde, ed in conseguenza quello dell'intera piramide giaceranno sulla Ao. E similmente troveremmo che il centro richiesto dovrà trovarsi ancora sulla Dh che unisce il vertice D col centro di gravità h dell'opposta faccia ABC; il centro di gravità della piramide giacerà dunque nell'intersezione g delle due rette Ao e Dh.

Or conducendo la ho, questa retta, poichè divide in parti proporzionali i lati Am e Dm del triangolo ADm, sarà parallela al terzo lato AD. Quindi i triangoli ADg ed hgo saranno simili, e ne avremo la proporzione:

$$Ag : go = AD : ho.$$

Ma pei triangoli simili ADm ed hmo si ha l'altra proporzione:

$$AD : ho = Dm : om = 3 : 1 ;$$

sarà dunque: $$Ag : go = 3 : 1 ;$$

quindi $Ag = \frac{3}{4} Ao$.

In conseguenza: *il centro di gravità di una piramide triangolare starà ai tre quarti della congiungente uno qualunque dei suoi vertici col centro di gravità della faccia opposta.*

Or potremo facilmente estendere lo stesso teorema ad una piramide poligonale qualunque, e quindi al cono che n'è il limite. Imperocchè partendo dal principio che ogni sezione *mm* (Fig. 36) fattavi da un piano parallelo alla base, prende una figura simile a quella della base, sarà facile dimostrare che la congiungente il vertice A col centro di gravità *o* della base passerà pei centri di gravità di tutte le sezioni ad essa parallele; e che in conseguenza immaginando la piramide divisa in falde parallele alla base, i centri di gravità di tutte le falde e perciò quello dell'intera piramide giaceranno sulla detta congiungente. Ma il centro richiesto dovrà stare ancora sul piano che parallelamente alla base sia condotto pei tre quarti dell'altezza, giacchè in quel piano giaceranno i centri di gravità delle piramidi triangolari nascenti dalla divisione del poligono di base in triangoli; la sua vera posizione dunque sarà nell'incontro del piano indicato colla retta A*o*, vale a dire che starà ai tre quarti della congiungente il vertice della piramide col centro di gravità della sua base.

Il teorema è dunque indipendente dal numero di lati della piramide, e perciò si applica immediatamente al cono che costituisce il limite delle piramidi poligonali.

Or da questi pochi esempii si rileva che ogni corpo fisicamente omogeneo, la cui figura abbia un punto, una linea od un piano di simmetria, dovrà in essi avere il suo centro di gravità. Quindi un cerchio, una sfera, un'ellissoide, ecc., avranno i loro centri di gravità nei centri di figura: un cilindro l'avrà nel punto medio del suo asse, un parallelepipedo nel punto comune ai suoi tre piani di simmetria. Così ancora il centro di gravità degli animali vertebrati giacerà in generale nel piano di simmetria della loro figura; ma potrà scorrere lungo questo piano, potrà ancora allontanarsene in un senso o nell'altro, secondo i varii atteggiamenti che l'animale darà al suo corpo; essendochè la posizione del centro di un

sistema di forze parallele eguali dipende dalla relativa posizione dei loro punti di applicazione. E mercè queste vedute teoretiche i fisiologi han potuto collegare al fatto della gravità i fenomeni della stazione, del passo, del salto, della corsa e di tutti gli atteggiamenti che il corpo dell'animale è costretto a prendere nell'esecuzione dei suoi moti.

35. Poichè la risultante delle forze con cui la gravità sollecita le molecole di un corpo, è applicata al suo centro di gravità ed è verticalmente diretta, così per ottenerne l'equilibrio basterà che nella stessa verticale si opponga una forza eguale al peso del corpo. Perciò un corpo sospeso o sostenuto non potrà essere in equilibrio, se il punto di sospensione o di sostegno, oltre ad essere abbastanza resistente, non si trovi sulla verticale che passa pel suo centro di gravità; e se il corpo tocca il sostegno in più punti, sarà d'uopo che la verticale condotta pel suo centro di gravità cada dentro il poligono formato dalle congiungenti i punti di contatto. Diversi stati di equilibrio.

Ma se queste condizioni sono sufficienti a produrre l'equilibrio del corpo, potrebbero non essere valevoli a guarentirne la durata contro le azioni perturbatrici. Immaginiamo, a modo di esempio, che una palla fisicamente omogenea sia poggiata sopra un piano orizzontale. È chiaro che essa vi rimarrà in equilibrio, stante che il suo centro di gravità confondendosi col suo centro di figura, starà sulla verticale del punto di contatto; e perciò se la palla sia alquanto rimossa dal suo luogo, troverà subito un'altra posizione di equilibrio, nella quale durerà finchè nuova azione non venga a turbarla.

Un corpo, che analogamente alla palla da noi immaginata, non può abbandonare un luogo di equilibrio senza trovarne un altro, si dirà essere in *equilibrio indifferente;* ed è notevole che in questo caso il centro di gravità del corpo rimane ad una distanza costante dal punto di sospensione o dal piano di sostegno.

Or facciamoci a considerare un parallelepipedo rettangolare ed omogeneo BC (Fig. 40) che stando in equilibrio sulla base AB, sia obbligato a rotare intorno allo spigolo proiettato

in B. Il suo centro di gravità o descriverà in conseguenza l'arco circolare ozo'', sul quale andrà salendo finchè non sarà giunto ad incontrare in z il piano verticale condotto per lo spigolo B della base. Prima che il centro o pervenga in z, il parallelepipedo avrà tendenza di ritornare al suo luogo di equilibrio; ma appena oltrepassato il punto z, il parallelepipedo continuerà da se stesso a discendere fino a trovare una nuova posizione di equilibrio in BC'', dalla quale non potrebbe rimuoversi senza l'azione di una forza che aiutasse il suo centro di gravità a salire per l'arco $o''z$.

Quando l'equilibrio di un corpo è tale che tende di ritornarvi, appena cessata l'azione perturbatrice, allora si dice *equilibrio stabile*; e si dirà *instabile* se il corpo invece di ritornare alla prima posizione di equilibrio, tende invece a vieppiù allontanarsene. Così è stabile l'equilibrio del parallelepipedo BC quando il suo centro di gravità dalle posizioni o od o'' non è ancora pervenuto in z; ed è viceversa instabile, allorchè il suo centro di gravità occupa quest'ultimo luogo. E si osservi che in z il centro di gravità occupa il luogo più alto possibile, ed in o'' è al più basso possibile.

Metodo sperimentale per la determinazione del centro di gravità di un corpo.

36. La condizione di equilibrio di un corpo sospeso o sostenuto ci offre un metodo sperimentale per la determinazione dei centri di gravità, pregevole quando il corpo, come di ordinario avviene, non è fisicamente omogeneo o che la sua figura non possa ammettere definizione geometrica.

Sospendendo il corpo, di cui si vuol determinare il centro di gravità, ad un filo fermato ad un punto della sua superficie, è chiaro per le cose anzidette che il centro di gravità del corpo dovrà giacere sulla verticale che passa pel punto di sospensione. Il luogo di unione del filo al corpo già segna sulla sua superficie un punto di questa verticale; per averne un secondo basterà trovare il punto della superficie che nella rotazione del corpo intorno al filo di sospensione, sia costantemente a contatto con una punta acuminata che gli si avvicini dalla parte inferiore. Avremo così definito sulla superficie del corpo due punti di una retta che passa pel suo centro di gravità: allo stes-

so modo definiremo una seconda retta che passi per lo stesso centro, e nella intersezione delle due rette avremo il punto richiesto.

Due rette, che passino pel centro di gravità di un corpo, potranno ancora definirsi nel seguente modo. AB (Fig. 41) è un piano orizzontale fisso; DC è un piano mobile intorno ad un asse C parallelo ad AB, e che per mezzo di una vite fermata all'arco AL può fissarsi sotto quella inclinazione che si vuole. Il corpo da sottoporsi all'esperimento si appoggia in parte al piano DC ed in parte gravita su AB, toccandolo in un punto *m* già definito dal piombino *n*. Ciò fatto, si muoverà lentamente il piano DC per mezzo della vite adattata all'arco AL, finchè il corpo sia talmente in bilico sul punto *m* che, spingendolo un poco di più, cadrebbe dalla parte opposta. È chiaro che allora il centro di gravità del corpo starà sulla verticale *mn*; e che in conseguenza basterà abbassare il piombino finchè tocchi il corpo, perchè il punto *s* così definito, insieme al punto di sostegno *m*, ci diano una retta che passa pel centro richiesto: allo stesso modo se ne determinerà un'altra. L'astronomo inglese Pond ha usato con successo questo metodo in casi che richiedevano una precisa determinazione.

37. Dall'essere la gravità di eguale energia in tutte le minime particelle di materia risulta che chiamando g la dose di gravità posseduta da ogni particella ed m il loro numero per un dato corpo, la loro risultante, ossia il peso del corpo, sarà espressa da mg; e similmente il peso di un altro corpo di massa m' sarà misurato da $m'g$. Quindi se i due pesi siano dinotati da p e p', avremo la proporzione: **Misura delle masse. Bilancia.**

$$p : p' = mg : m'g = m : m' ;$$

vale a dire che le masse dei corpi sono proporzionali ai loro pesi, e che in conseguenza basterà saper determinare la ragione dei pesi per conoscere quella delle masse.

A tal uopo immaginiamo una retta inflessibile *ab* (Fig. 34) mobile intorno al punto fisso *c*, e che nei punti estremi tenga sospese le due masse *m* ed *m'*. Essendo che i pesi di queste due

masse tendono a far rotare la linea *ab* in opposte direzioni, è chiaro (n° 28) che la retta starà in equilibrio, se i due momenti $m.ac$ ed $m'.bc$ siano tra loro eguali. Quindi se poniamo $ac=bc$, l' equilibrio del sistema sarà possibile nella sola ipotesi di $m=m'$.

Or se poniamo in vece della retta inflessibile un'asta rigida, ed ai fili di sospensione attacchiamo due coppe, avremo l'istrumento conosciuto sotto il nome di *bilancia*. Quando invece di un'asta rigida, ossia *giogo* della bilancia, s'immagina una retta inflessile, il centro di gravità dovrà rimaner confuso coll'asse di rotazione, e l'equilibrio risultare indifferente (n° 35). Ma di una simile bilancia non sapremmo che fare, poichè essa rimarrebbe in equilibrio sotto qualunque inclinazione del giogo. Perciò il centro di gravità vuol essere fuori dell'asse di rotazione; non sopra dell'asse, perchè l'equilibrio sarebbe instabile ed in conseguenza la pesata diverrebbe impossibile, ma al disotto dell'asse, affinchè il peso del giogo, che ivi si concentra, possa spingerlo a tornare nella sua posizione di equilibrio; e così avremo una bilancia oscillante.

Giova però osservare che se facendo scendere più basso il centro di gravità del giogo si accresce la tendenza della bilancia a tornare nella sua posizione normale, la sua *sensibilità* ossia attitudine ad indicare le minime differenze di peso, va invece diminuendo. Ed invero poniamo che il centro di gravità del giogo scenda di *cg* (Fig. 39) sotto l'asse di rotazione *c*, e che per un eccesso di peso *p* nella coppa *b* il giogo prenda la posizione inclinata *mn*. Allora il suo peso P col momento $P.gs$ (supponendo che *cs* sia la verticale che passa pel punto *c*) dovrà fare equilibrio all'opposto momento $p.nt$ dell'eccesso di peso *p* esistente nella coppa *b*. Or immaginando che il centro di gravità *g* del giogo fosse mobile lungo la retta *cg*, ne seguirebbe aumento o diminuzione nel valore del momento $P.gs$, secondochè *g* sarebbe più o meno lontano dall'asse *c*; ed in conseguenza secondo la stessa ragione dovrebbe variare l'eccesso *p*, per ottenere lo stesso angolo d'inclinazione *gcs*.

A dati eguali una bilancia sarà dunque tanto più sensibile,

quanto meno il centro di gravità del suo giogo si allontanerà dall'asse di rotazione. Ed a poterne facilmente giudicare, la Meccanica razionale ci dà la seguente regola — Equilibrata che sia la bilancia, diasi un piccolo urto ad una delle sue coppe: ne seguirà un moto di oscillazione, e la bilancia sarà tanto più sensibile per quanto più lente saranno le sue oscillazioni (Ved. n° 49).

Ma non è poi la sola posizione del centro di gravità del giogo che decide del grado di sensibilità di una bilancia ; vi hanno parte ancora l'attrito più o meno grande nell'asse di rotazione e la lunghezza del giogo. Il quale nelle migliori bilancie è sostenuto da un prisma triangolare di acciaio ben temperato che con uno dei suoi spigoli poggia sopra un piano di agata assai levigata: in quello spigolo sta l'asse di rotazione della bilancia, e si comprende come l'attrito ivi debba esser debolissimo. Quanto poi all'influenza della lunghezza del giogo, l'espressione del momento *p.nt* (Fig. 39) di sopra mentovato, la pone in evidenza ; imperocchè facendo crescere il braccio *cn* e quindi la distanza *nt*, nella stessa ragione dovrà scemare l'eccesso di peso *p*, atto a produrre lo stesso angolo di deviamento *gcs*. Questa condizione è purtuttavia limitata dall'altra egualmente importante della massima rigidezza del giogo, congiunta al suo minimo peso ; essendochè l'attrito, che si vuol minimo nell'asse, è proporzionale al peso del giogo , unito a quello delle coppe colla loro carica.

Abbiamo supposto finora che la bilancia fosse ridotta al semplice giogo: e ciò sarà lecito finchè la congiungente i punti di sospensione delle coppe passerà per l'asse di rotazione. Imperocchè quando si prescinda dalla differenza di carica che produce l'inclinazione del giogo , i punti di sospensione *a* e *b* (Fig. 43) si dovranno considerare caricati di pesi eguali ; i quali avendo il loro centro di gravità nel punto medio *e* del loro intervallo *ab* e quindi nell'asse di rotazione, ivi non fanno che produrre un aumento di pressione. Ma la cosa andrà diversamente , allorchè quella congiungente non incontri l'asse di rotazione. Poniamo che l'asse sia in *c* ed in *g* il centro di gravità del giogo: chiamiamo W la somma delle cariche eguali

nei punti *a* e *b*, P il peso del giogo, e conduciamo la verticale *cv* e le orizzontali *es*, *gv*. È chiaro che i momenti W.*es* e P.*gv* tenderanno a ricondurre la bilancia alla posizione normale ; quindi è che ponendo l'asse di rotazione al disopra della retta che unisce i punti di sospensione delle coppe, la mobilità della bilancia viene a scapitarne. Al contrario se l'asse si ponesse in c' inferiormente ad *ab*, la mobilità della bilancia ne verrebbe accrescluta dall' opposta direzione dei momenti W.$c's'$ e P.gv'; e quando la carica fosse portata al segno di rendere W.$c's'$=P.gv', allora ogni piccolo peso aggiunto ad una delle coppe farebbe immediatamente traboccare la bilancia.

La determinazione del peso di un corpo per mezzo di pesata ordinariamente si ottiene ponendo il corpo in una delle coppe, e gravando l'altra di pesi normali fino ad ottenere un esatto equilibrio. Or perchè si potesse allora ritenere che il peso del corpo tra i limiti di mobilità della bilancia pareggi quello dei pesi normali a cui fa equilibrio, sarebbe d'uopo che molte condizioni, difficilissime ad attuarsi, fossero soddisfatte nella costruzione della bilancia. Da ciò si rileva di quanto merito sia il metodo delle *doppie pesate* inventato da Borda ; metodo che non richiede altra condizione nell' istrumento , che una squisita mobilità. Posto in una delle coppe il corpo che si vuol pesare , si ridurrà la bilancia al suo giusto equilibrio caricando l'altra coppa con qualunque materia; indi si toglierà il corpo, ed in sua vece si porranno tanti pesi normali, quanti basteranno a ripristinare l'equilibrio : è chiaro che a questo modo avremo la desiderata eguaglianza, tra i limiti di sensibilità dell'apparecchio.

CAPO SECONDO.

LEGGI DELLA DISCESA DEI GRAVI NEL VOTO.

38. Le osservazioni più ovvie bastano a chiarire che la gravità è una forza continua, e che in conseguenza debba risultarne un moto vario. E poichè non possiamo concepire altrimenti l'azione di una forza continua, se non come una serie d'impulsi che si succedono nella serie degl'istanti del tempo, così siamo condotti a distinguere due specie di forza continua, l'una composta d'impulsi di eguale energia, l'altra d'impulsi le cui intensità formano una serie crescente o decrescente. Noi cominceremo dal supporre che la gravità appartenga alla prima specie, lasciando poi decidere all'esperienza se questo concetto sia o no conforme al fatto. Leggi della discesa verticale.

Dal considerare la gravità come costante tra i limiti di altezza a cui possono estendersi i nostri sperimenti, segue che se un grave, scendendo liberamente, acquisti la velocità g nella 1ª unità di tempo, quella che acquisterà nel tempo t dovrà essere espressa da gt. Imperocchè le velocità acquistate risultando da somme d'impulsi eguali, dovranno essere proporzionali ai numeri d'impulsi e quindi alle durate dell'azione. E così nell'equazione:

1. $$v = gt,$$

che rappresenta la velocità proporzionale al tempo, si formola la 1ª legge della discesa verticale dei gravi nel voto.

Per ottener poi la relazione dello spazio percorso alla durata del moto, supponiamo ciascuna unità di tempo divisa in un gran numero di parti eguali, e che al cominciar di ogni una di esse la gravità ripeta i suoi impulsi. Chiamando n il numero delle parti, in cui s'immagina divisa l'unità di tempo, a il cammino fatto dal grave nella 1ª di queste n^{sime} par-

ti, σ quello percorso nell'intera unità; è chiaro che il valore di σ dovrà pareggiare la somma dei primi n termini della progressione aritmetica:

$$a, 2a, 3a, 4a, \ldots . na,$$

e quindi si avrà:

$$\sigma = a\frac{(n+1)n}{2}.$$

E similmente il cammino s fatto dal grave nelle prime t unità di tempo sarà dato dall'equazione:

$$s = a + 2a + 3a + \ldots + nta = a\frac{(nt+1)nt}{2}.$$

Dalle quali due equazioni eliminando a, si ottiene:

$$s = \sigma\frac{(nt+1)t}{n+1} = \sigma\frac{\left(t+\frac{1}{n}\right)t}{1+\frac{1}{n}}.$$

E perchè quest'ultima espressione, ottenuta nell'ipotesi di una azione intermittente, possa applicarsi al fatto della sua continuità, è sufficiente porvi $n = \infty$ e quindi $\frac{1}{n} = 0$. Così si ottiene:

2. $$s = \sigma t^2;$$

vale a dire che nella caduta verticale dei gravi nel voto gli spazii sono proporzionali ai quadrati dei tempi.

Stando a questa legge e supponendo che il tempo t si accresca di Δt, avremo, chiamando s_1 il cammino fatto nel tempo $t + \Delta t$,

$$s_1 = \sigma(t + \Delta t)^2;$$

ed in conseguenza:

$$s_1 - s = \sigma[(t + \Delta t)^2 - t^2] = \sigma(2t\Delta t + (\Delta t)^2).$$

E poichè lo spazio $s_1 - s$ percorso nel tempo Δt, potrebbe esse-

re ancora l'effetto di un moto uniforme compiuto nello stesso tempo Δt con una velocità w data dall'equazione:

$$s_1 - s = w . \Delta t ,$$

così avremo:

$$w . \Delta t = \sigma(2t\Delta t + (\Delta t)^2) ,$$

ossia:

$$w = \sigma(2t + \Delta t).$$

Or la velocità w, che evidentemente dev'esser maggiore della velocità v posseduta dal grave al termine del tempo t, si avvicinerà tanto più a quest'ultima, per quanto la differenza Δt sarà più piccola; dimodochè ponendo $\Delta t = 0$, sarà $w = v$, ed in conseguenza si avrà:

$$v = 2\sigma t.$$

Ma l'equazione 1 ci dà $v = gt$; è dunque $g = 2\sigma$, vale a dire che la velocità acquistata dal grave nella 1ª unità di tempo, è tale che in egual durata gli farebbe percorrere uno spazio doppio del già percorso. E la stessa relazione ha luogo ancora tra la velocità acquistata in un tempo qualunque ed il cammino fatto nello stesso tempo; imperocchè sostituendo a σ nell'equ: 2 il suo valore $\frac{1}{2}g$, e ponendola sotto la forma:

$$s = \tfrac{1}{2} gt . t = \tfrac{1}{2} vt ,$$

è chiaro che lo spazio s è metà di quello che nello stesso tempo t sarebbe percorso colla velocità v.

Or se dalle equazioni $v = gt$ ed $s = \frac{1}{2} gt^2$ eliminiamo t, avremo:

3. $$v = \sqrt{2gs} ,$$

che esprime la relazione esistente tra l'altezza della caduta e la velocità finale.

39. Passiamo ora a vedere se il fatto conferma le precedenti deduzioni del calcolo. Le quali, perchè ottenute nell'ipotesi che la caduta avvenisse nel voto, richieggono che gli sperimenti s'instituiscano in modo da poter negligere la resistenza dell'aria. A ciò provvede la *macchina di Atwood*, la cui costru- Macchina di Atwood.

zione è fondata e sul dato sperimentale che la resistenza di un mezzo diminuisce assai più celeramente che non faccia la velocità del mobile che lo attraversa, e sul principio razionale che le leggi trovate nel n° precedente non dipendono dal valore assoluto della gravità, ma dalla continuità dell'azione costante che in essa si è supposta.

L'organo principale della macchina di Atwood è una girella (Fig. 25) per la cui gola passa un filo da cui pendono due masse eguali m, n; le quali si faranno equilibrio, essendo che i loro momenti di rotazione intorno all'asse della girella sono eguali ed opposti. Ma se ad una delle masse m od n aggiungasi un peso addizionale m', l'equilibrio sarà distrutto, e la girella comincerà a rotare verso il lato in cui si trova la carica maggiore; la quale pertanto scenderà con una velocità minore di quella che avrebbe avuta se non fosse stata all'altra congiunta. Imperocchè la gravità di m' essendo la forza che deve dar moto ad m, n ed m', la velocità g che la massa m' avrebbe acquistata in 1^s scendendo sola, ora diverrà $g\frac{m'}{2m+m'}$ (n° 11); quindi si potrà prendere m' abbastanza piccola, perchè si raggiunga il doppio scopo, di rendere cioè presso che nulla la resistenza dell'aria e rallentare la caduta in modo da poter seguire coll'occhio il grave che scende.

In questo modo di sperimentare avvi purtuttavia una cagione di errore che falserebbe i risultamenti se non fosse abbastanza attenuata. Questa cagione è nell'attrito che l'asse della girella incontra su i sostegni; e per chiarirne l'influenza poniamo che la ragione degli spazii descritti nelle successive unità di tempo dalle masse m ed n per l'azione del peso addizionale m' debba esser rappresentata dalla serie:

$$a,\ 3a,\ 5a,\ 7a, \ldots;$$

e che per la resistenza dell'attrito essa divenga in vece:

$$a-b,\ 3a-b',\ 5a-b'',\ 7a-b''', \ldots$$

Or perchè questi numeri fossero nella stessa ragione che quelli

della prima serie, sarebbe d'uopo che si avessero le relazioni $b'=3b, b''=5b, b'''=7b$, ecc. le quali non sono di accordo colle leggi sperimentali dell'attrito. Bisognava dunque provvedere a renderlo trascurabile ; ciò Atwood ottenne nel seguente modo.

In vece di far riposare l'asse della girella su due sostegni fissi, egli l'ha fatto poggiare su due coppie di ruote, come mercè due projezioni si vede rappresentato nella fig. 19. Così l'asse non potendo girare senza dar moto alle ruote su cui poggia, incontra un attrito di rotazione in vece di quello di semplice strofinio che è molto più grande ; e quanto a quello che si produce negli assi delle ruote di sostegno fa d'uopo osservare che esso agisce con un braccio di leva eguale al raggio dell'asse, mentre la potenza che deve vincerlo ha per braccio di leva il raggio della ruota : quindi vi è grande economia di quella frazione della forza di gravità che deve vincere la resistenza al moto.

La macchina di Atwood è rappresentata nella fig. 20. Sulla base AR, sorretta da tre viti che servono ad orizzontarla , si eleva la colonna D, su cui poggia la tavoletta CE che sostiene le quattro ruote destinate a portare l'asse della girella, e che per due fori in essa scolpiti dà passaggio al filo da cui pendono le masse eguali *m* ed *n*. Ad un lato della colonna D si trova la riga KL divisa in parti eguali perchè con essa si possa misurare lo spazio percorso dal grave, e nell'altro lato vi è l'orologio a pendolo Z per la misura del tempo. Sulla faccia inferiore della tavoletta è aggiustata la leva a gomito *vh* , la quale da una parte finisce nella punta *s*, destinata a sostenere la massa *m* quando sarà gravata dal peso addizionale *m'*, e coll'altro estremo si annoda ad un congegno esistente nella cassa dell'oriuolo, e pel quale a piacere di chi sperimenta è fermato l'indice sul quadrante senza far cessare le oscillazioni del pendolo. Volendo far uso della macchina , si comincerà dall'orizzontarne esattamente la base mercè le tre viti su cui poggia , indi caricato l'oriuolo e dato moto al pendolo, si spingerà in alto l'asta T, che con questo movimento arresterà l'indice, e fermerà verticalmente la punta *s*. Su questa si porrà la massa *m* col suo peso

addizionale, e quando il tutto sia bene ordinato, allora con un tratto coincidente ad una pulsazione del pendolo si tirerà in basso l'asta T, e così sarà contemporaneamente liberato l'indice dell'oriuolo, e sottratto il sostegno *s* alla massa *m*. La quale per l'azione del peso addizionale scenderà lungo la riga KL finchè non incontri il piattello *g* (*fig.* 27) che può scorrere lungo la stessa riga mercè l'anello *r*, e che per mezzo di una vite può esser fermato all'altezza che si vuole.

Ora veniamo agli sperimenti — 1°. Lasciata in riposo la massa *m* col suo peso addizionale sulla punta *s* preparata a riceverla, si fermi l'anello *r* a tal divisione della riga KL, che il grave scendendo percuota il piattello *g* contemporaneamente ad una pulsazione del pendolo, che supponiamo esser la terza a contare dal principio della caduta. Indi si rimuova l'anello *r* dal suo luogo, si fermi ad una distanza dallo zero della scala, 4 volte più grande della prima, e si ripeta l'esperimento: si troverà che il grave percorrerà questa distanza, quadrupla della prima, in un tempo doppio, ossia che batterà sul piattello *g* alla sesta pulsazione del pendolo. E potremo analogamente determinare tra i limiti della lunghezza di KL gli spazii corrispondenti ai tempi 1, 2, 3, ecc. Così resterà verificata la legge degli spazii proporzionali ai quadrati dei tempi.

— 2°. Sulla stessa riga KL è mobile ancora l'anello *r'* (*fig.* 26) che in vece di un piattello porta un anello circolare pel quale passa liberamente la massa *m*, ma ne viene arrestato il suo peso addizionale. Or si fermi l'anello *r'* ad una divisione qualunque, purchè il peso addizionale vi batta in coincidenza di una pulsazione del pendolo, e si arresti l'anello *r* ad una distanza da *r'* che sia doppia di quella che separa *r'* dallo zero della scala. Lasciando allora cadere dal solito luogo la massa *m*, questa abbandonerà sull'anello *g'* il suo peso addizionale, e percorrerà lo spazio compreso tra *r'* ed *r* in virtù della velocità acquistata cadendo da 0 ad *r'*. Questi due spazii si osserveranno descritti in tempi eguali; e resterà così verificata la legge che: *la velocità acquistata da un grave cadendo per un tempo qualunque, è tale che gli farebbe descrivere in egual tempo*

uno spazio doppio del già percorso. E ponendo il piattello *g* a diverse distanze dall'anello *g'*, si verificherà ancora l'uniformità del movimento prodotto dalla velocità acquistata.

Rifacendo più volte questo 2° sperimento, e ponendo ad ogni volta l'anello *r'* ad una diversa distanza dallo zero della scala, troveremo che lo spazio descritto nel tempo 1, a contare dall'istante in cui è cessata l'azione del peso addizionale, è sempre proporzionale al tempo pel quale questo peso è caduto. E così rimane ancora verificata la legge della velocità proporzionale al tempo, espressa dall'equazione $v = gt$.

— 3°. Mercè le leggi finora dichiarate egli è facile comprendere che un corpo per elevarsi ad una data altezza in virtù di impulso verticale, è d'uopo che parta con una velocità eguale a quella che in opposta direzione avrebbe acquistata scendendo dalla stessa altezza. Per verificare questa deduzione colla macchina di Atwood, all'anello *r'* si aggiungerà il braccio *abc* (Fig.28), che va perpendicolarmente all'asta KL; indi, caricate di piccoli pesi eguali le due masse *m* ed *n*, si farà scorrere l'anello *r'* lungo la KL, finchè i pesi addizionali si troveranno a livello degli anelli *g'* e *c*. Dopo ciò si porterà la massa *m* colla sua carica sulla punta *s* già preparata a riceverla, mentre la massa *n* discendendo lascerà il suo peso addizionale sull'anello *c*. Or sottraendo il sostegno alla massa *m*, questa nella sua caduta abbandonerà la carica sull' anello *g'* nel medesimo istante, in cui la massa *n* salendo riprenderà il suo peso addizionale che giaceva sull'anello *c*. Così tutta la velocità acquistata da *m* nella sua caduta, sarà impiegata ad innalzare *n*, che vedremo pervenire prossimamente all'altezza medesima in un tempo quasi eguale a quello della caduta. E la piccola differenza che si osserva nei valori del tempo e dello spazio dipende dalle resistenze dell'attrito e dell'aria , che quantunque di molto attenuate, non sono purtuttavia nulle ; e perciò avviene che risalendo *m* per la successiva caduta di *n*, e poi questa per una nuova caduta dell'altra, gli spazii vanno continuamente restringendosi del pari che le durate dei moti , e le due masse *m* ed *n* tornano finalmente al riposo.

I risultamenti sperimentali della macchina di Atwood sono dunque in perfetto accordo con quelli che ci han dato le formole calcolate nell'ipotesi di una gravità costante. Questa forza è dunque da riguardarsi come invariata nelle piccole altezze su cui possiamo sperimentare; e nel Capo III di questo Libro vedremo come questa identità di energia nelle piccole distanze dal suolo sia conseguenza di una legge di variazione a cui la gravità è realmente sottoposta.

Via de'proietti nel voto.

40. Le leggi, che abbiamo esposto, della libera discesa dei gravi nel voto, sono state scoverte da Galilei, e la prima applicazione ch'egli ne fece, fu quella di determinare la curva che i proietti descriverebbero in un mezzo non resistente. Tartaglia, celebre geometra italiano, aveva già conosciuto che i proietti lanciati dalle arme da fuoco percorrono una curva, la cui massima ampiezza debba corrispondere all'inclinazione di 45°; ma non conoscendo la relazione dello spazio al tempo nella caduta di un grave, non ebbe mezzo di definire la natura della curva. Questa fu trovata da Galilei dover essere una parabola conica, finchè la resistenza dell'aria può esser negletta; ed in questa determinazione si ebbero i primi elementi della scienza balistica.

Supponiamo che ad un corpo A (Fig.29) si dia un urto nella direzione Ac, mentre la gravità lo spinge a scendere per la verticale Ah. Partendo dal dato empirico (n° 15) della mutua indipendenza delle forze, potremo supporre che mentre il corpo scende per un canaletto verticale Ah, questo sia spinto in modo che il punto A di partenza del grave percorra con moto uniforme la retta Ac. Così, ponendo che Ab sia il cammino fatto dal canaletto nella 1ª unità di tempo ed Ag l'altezza donde il grave sarebbe disceso nello stesso tempo, avremo che il suo vero luogo sarà nel vertice s del parallelogrammo costruito su Ab ed Ag; nello stesso modo definiremo il luogo t che occuperà al termine della 2ª unità di tempo, e così di seguito. Or nella discesa dei gravi nel voto gli spazii essendo proporzionali ai quadrati dei tempi, avremo $Ah = 4Ag$, mentre pel moto uniforme comunicato al canaletto si ha $th = 2gs$; quindi la proporzione:

$$Ah : Ag = \overline{th}^2 : \overline{gs}^2,$$

dalla quale risulta che la curva A*st* è una parabola conica.

41. Su di un piano AB (Fig. 30) inclinato all'orizzontale AC supponiamo lasciato un corpo *m*. Questo non potendo scendere per la verticale *mz*, perchè impedito dal piano AB, dovrà premerlo con una parte almeno della sua forza di gravità, che resterà distrutta dalla resistenza del piano. Or la pressione non può esser che normale alla superficie che la riceve, poichè se potesse agire in direzione obbliqua, come *hs* (Fig. 31), la potremmo allora riguardare qual risultante di due forze, l'una *st* nel piano tangente alla superficie, e che non troverebbe verun ostacolo a muovere il punto *s*, e l'altra diretta secondo la normale *ns* che distrutta dalla superficie rappresenterebbe il vero valore della pressione. Laonde per definire qual parte della gravità, rappresentata da *mz*, sia distrutta dal piano AB, e quale ne resti a produrre il moto del corpo lungo il piano, è d'uopo decomporre la *mz*, in due altre, l'una diretta secondo la *mn* perpendicolare al piano, e l'altra secondo *mp* parallela allo stesso piano. E così compiuto il rettangolo, troveremo che *mn* rappresenterà la pressione, ed *mp* la forza acceleratrice. Or da questa costruzione risultano i seguenti corollarii. Discesa dei gravi per piani inclinati.

— 1°. Essendo *mz* perpendicolare al piano AC ed *mn* ad AB, sarà il piano *zmn* perpendicolare ai due piani AC ed AB, e quindi alla loro comune intersezione proiettata in A. Or questa retta, essendo perpendicolare al piano *zmn*, sarà perpendicolare ancora ad ogni retta che in questo piano sia condotta pel suo piede, e quindi alla intersezione dello stesso piano col piano AB, ossia alla linea secondo la quale il grave è spinto dall'azione della forza *mp*. Un grave dunque, scendendo per un piano inclinato, seguirà una retta perpendicolare alla comune intersezione del piano inclinato col piano orizzontale, ossia che nel passare dal primo piano al secondo andrà per la linea più breve e quindi di massimo pendio. Perciò avviene che quando una pietra scende pel fianco ineguale di una montagna, descri-

ve una curva sinuosa che in tutti i suoi punti si confonderebbe colla linea di massima pendenza, se la velocità acquistata non la facesse da essa divergere, spingendola per la tangente alla sua traettoria.

— 2°. I due triangoli pmz ed ABC, simili perchè equiangoli, ci danno la proporzione:

$$pm : mz = BC : AB\ ;$$

vale a dire che la forza pm che spinge il grave a scendere pel piano inclinato, sta alla mz che lo sollecita per la verticale, come l'altezza BC del piano inclinato è alla sua lunghezza AB. Laonde ponendo $pm = g'$, $mz = g$, l'altezza BC del piano inclinato $= a$ e la sua lunghezza $= l$, si avrà:

$$g' = g\,\frac{a}{l}.$$

E perciò g' varierà in ragion diretta di a e nell' inversa di l. Così ponendo $a = 0$, vale a dire che il piano sia orizzontale, avremo $g' = 0$, ed il corpo rimarrà in quiete; e se in vece facciamo $a = l$, il piano come verticale non opporrà veruna resistenza, e sarà $g' = g$. Facendo per l'opposto che variasse soltanto l, avremmo risultamenti inversi ai precedenti, vale a dire che g' diverrà più o meno grande, come viceversa l sarà più o meno piccola. E poichè facendo decrescere l quando a è costante, si aumenta l'inclinazione del piano all'orizzonte, così si comprende perchè i gravi scendano più celeramente pei piani che hanno maggior pendenza.

Si osservi ancora che essendo costante il rapporto di g' a g per tutti i punti di un dato piano inclinato, costante ancora sarà il valore di g' tra gli stessi limiti in cui lo è il valore di g. Quindi il piano inclinato, che al pari della macchina di Atwood, può rallentare la celerità della discesa a piacere dell'osservatore, è stato adoperato da Galilei per dimostrare la realtà delle leggi da lui scoverte sulla caduta dei gravi. E perciò basterà sostituire g' a g nelle formole 1, 2 e 3 del n° 38 per ottenere le relazioni:

$$v=g\frac{a}{l}t,\quad s=\tfrac{1}{2}g\frac{a}{l}t^2,\quad v=\sqrt{2g\frac{a}{l}s},$$

che avranno luogo nella discesa dei gravi pei piani inclinati.

Dalla prima di queste formole si rileva che nella discesa pei piani inclinati la velocità è proporzionale al tempo, egualmente che nella caduta verticale.

Dalla seconda formola poi possiamo rilevare la relazione esistente tra gli spazii percorsi in un medesimo tempo da due gravi l'uno che scende per un piano inclinato, l'altro per la corrispondente altezza. Poniamo, per esempio, che dal punto B (Fig.32) partano nel tempo stesso due gravi, l'uno scendendo pel piano inclinato BA, l'altro per la verticale BC; e che, essendo la caduta del secondo più celere di quella del primo, si voglia conoscere il punto n in cui questo sarà giunto, quando l'altro sarà pervenuto in C. Chiamando a lo spazio BC ed x lo spazio Bn le formole corrispondenti ci daranno:

$$a=\tfrac{1}{2}gt^2 \text{ ed } x=\tfrac{1}{2}g\frac{a}{l}t^2;$$

quindi:

$$x:a=\frac{a}{l}:1=a:l.$$

Ma conducendo la Cn perpendicolare a AB, abbiamo per una nota proprietà del triangolo rettangolo:

$$Bn:a=a:l;$$

dunque sarà $x=Bn$. Vale a dire che per trovare il luogo del grave che scende pel piano inclinato BA, quando l'altro che cade per la verticale BC, è giunto in C, bisognerà condurre per questo punto una perpendicolare a BA. Quindi se immaginiamo diversi piani inclinati, BA, BA′, BA″, che tutti si intersecano in una medesima orizzontale proiettata in B, e che da un punto di questa retta partano nel medesimo tempo altrettanti gravi pei diversi piani inclinati, ed uno per la verticale BC; i luoghi contemporanei n,n',n'',C occupati da questi gravi giaceranno sulla semicirconferenza BnC descritta su

BC come diametro. E da ciò deriva la curiosa proprietà meccanica del cerchio, che un suo diametro verticale e le diverse corde che vanno a finire in un'estremità dello stesso diametro, saranno percorsi da gravi in tempi eguali.

In fine dalla 3ª delle suddette formole, ossia da $v=\sqrt{2g\frac{a}{l}s}$, rileviamo che ponendovi $s=l$, la velocità v, che il grave avrà nell'estremità A del piano inclinato BA, sarà espressa da $\sqrt{2ga}$, che disegna ancora la velocità che un grave scendendo per la verticale BC avrebbe nel punto C. Laonde un grave scendendo per un piano inclinato, avrà in ogni punto del suo cammino quella stessa velocità che avrebbe acquistata cadendo per la corrispondente altezza.

Discesa dei gravi per archi di curva.

42. Se un grave scendendo pel piano inclinato AB (Fig. 45) ne incontri un altro BC, ivi avverrà un urto e quindi una perdita di velocità; e se dal punto A sia abbassata la An perpendicolare al piano BC, la velocità residua con cui il grave entrerà in questo secondo piano, starà a quella acquistata nella discesa per AB, come Bn ad AB [1]; imperocchè rappresentando colla lunghezza AB del primo piano la velocità che il grave vi acquista, potremo riguardare questa velocità come risultante della velocità An normale al piano BC e quindi distrutta da questo piano, e della velocità Bn che si aggiungerà a quella che si produrrà lungo il piano BC. Or descritta col centro B ed il raggio BA la semicirconferenza tAs, avremo che il rapporto di Bn a BA è lo stesso che quello di Bn a Bs; ed in conse-

[1] Galilei pose il falso principio che un grave scendendo per una serie di piani inclinati dovesse avere al termine della sua corsa la velocità che avrebbe acquistata per la verticale della sua caduta. In questo errore incorsero parecchi, non escluso lo stesso Huyghens, senza considerare (ciò che desta meraviglia) ch'essendo il principio indipendente dall'angolo d'inclinazione dei piani, dovrebbe aver luogo anche quando l'angolo fosse retto; vale a dire che un grave cadendo sopra un piano orizzontale, dovrebbe su questo piano continuare il suo moto colla velocità che ha nel termine della sua caduta. Fu Varignon che pel primo nel 1693 avvertiva i meccanici della falsità di questo principio.

guenza la perdita di velocità, che avrà luogo nel passaggio del grave dal piano AB al piano BC, sarà proporzionale a $ns = Bs - Bn$, ossia al seno verso dell'angolo d'inclinazione ABs dei due piani.

Ma per un noto teorema di Geometria si ha la proporzione:

$$ns : An = An : nt\ ,$$

la quale ci fa conoscere che quando l'angolo ABs sia infinitamente piccolo e che tale ancora sia il suo seno An, il seno verso ns dovrà essere un infinitesimo d' infinitesimo, ossia infinitesimo di 2° ordine; e l' angolo ABs diviene infinitesimo, quando AB e BC rappresentano due elementi consecutivi di una curva qualunque; in conseguenza un grave scendendo per una curva, la sua velocità soffrirà una perdita infinitesimale di 2° ordine nel passaggio da un elemento all' altro della curva. E poichè questa sotto una lunghezza finita comprende un numero infinito di elementi, così quella perdita infinitesimale di 2° ordine si troverà ripetuta infinite volte nel termine della discesa. Ma un numero infinito di infinitesimi del 2° ordine equivale ad un infinitesimo di 1° ordine, e questo è nullo rispetto ad ogni quantità finita; così la perdita di velocità, che un grave scendendo per una curva soffre pel solo fatto della curvatura, è da riguardarsi come assolutamente nulla, e perciò la sua velocità in un punto qualunque della curva sarà quella stessa che avrebbe acquistata scendendo per la corrispondente altezza verticale — La teorica del pendolo, che andiamo ad esporre nel capo seguente, farà vedere l'alta importanza di questo teorema.

CAPO TERZO.

TEORICA DEL PENDOLO — LEGGI DELLA GRAVITÀ TERRESTRE.

Definizione del pendolo. 43. È noto (nº 35) che un corpo A (Fig. 35) sospeso ad un filo OA, starà in equilibrio, quando la direzione del filo sarà verticale; quindi se da questa posizione sia rimosso facendolo salire per l'arco AB, esso tenderà ritornarvi scendendo per l'arco BA. E qualora non vi si opponesse alcun ostacolo, il corpo scendendo per l'arco BA avrebbe in A (nº 42) la velocità dovuta all'altezza *h*A. Per questa velocità dovrebbe salire (nº 39, — 3º) fino a descrivere l'arco AC=AB; indi scenderebbe di nuovo verso A per salire una seconda volta verso B, e così continuerebbe indefinitamente il suo moto. Ma la resistenza dell'aria e l'attrito nel punto di sospensione fanno sì che la velocità realmente posseduta dal corpo in A, sia minore di quella che avrebbe acquistata scendendo dall'altezza *h*A; e questa prima perdita, che sola basterebbe ad impedire che il corpo giungesse in C, viene poi ad accrescersi di quella che le medesime resistenze produrranno nella salita per l'arco AC. Quindi il corpo si arresterà in un qualche punto C', intermedio ad A e C, donde poi discendendo verso A, oltrepasserà questo punto per un arco minore di AC'; e così diminuendosi successivamente l'estensione della sua corsa, il corpo ritornerà al primiero stato di riposo.

Un corpo così sospeso costituisce un *pendolo*: il movimento, con cui va da un lato all'altro della sua posizione di equilibrio, dicesi *oscillazione*; e col nome di *ampiezza di oscillazione* si distingue la quantità angolare del suo movimento.

Isocronismo. 44. Quando il pendolo è in una posizione OB diversa dalla verticale OA, la sua forza di gravità, che supponiamo rappresenta in grandezza e direzione dalla B*z*, dovrà decomporsi in due, l'una B*n* secondo il raggio OB e che produrrà tensione nel filo,

e l'altra Bt secondo la tangente al punto occupato dal mobile sull'arco di oscillazione, e che l'obbligherà a discendere per lo stesso arco. Chiamando α l'angolo di diviamento $BOA = nBz$, e g la forza di gravità, si avrà $Bn = g\cos\alpha$ e $Bt = g\,\text{sen}\,\alpha$; quindi il pendolo scenderà con moto variamente accelerato, essendo che la forza donde è sollecitato, non è costante ma variabile secondo il seno dell'angolo di deviamento. E se questo angolo sia abbastanza piccolo, perchè si possa sostituire al suo seno, allora la componente Bt sarà rappresentata da $g\alpha$, vale a dire che la forza acceleratrice sarà proporzionale all'arco che rimane a percorrere per arrivare al luogo di equilibrio.

Quando sia soddisfatta quest'ultima condizione, le oscillazioni di un pendolo godranno di un'importante proprietà. Immaginiamo due pendoli OB, OB' (Fig. 46) di eguali lunghezze, sospesi ad uno stesso punto O, ed allontanati dalla verticale per gli angoli BOA, B'OA, abbastanza piccoli per poter sostituire i loro seni, ed aventi una ragione determinata, che per maggior semplicità supponiamo esser quella di 2 a 1. Ponendo l'arco $BA = \alpha$, le forze acceleratrici donde i pendoli saranno animati nelle posizioni OB ed OB', saranno rappresentate da $g\alpha$ ed $\frac{1}{2}g\alpha$; quindi se nel 1° elemento di tempo il pendolo OB discenderà per l'arco Bn, OB' discenderà per $B'n' = \frac{1}{2}Bn$. Al cominciare del 2° elemento di tempo i due pendoli saranno deviati dalla verticale per gli archi nA ed $n'A$; e poichè:

$$nA = BA - Bn = 2(B'A - B'n')$$

e

$$n'A = B'A - B'n',$$

la ragione del primo arco al secondo sarà tuttavia quella di 2 a 1, e perciò nel 2° elemento di tempo lo spazio percorso dal pendolo OB sarà doppio ancora di quello percorso da OB'. La stessa ragione similmente troveremmo tra gli spazii corrispondenti al 3°, al 4°, ecc. elemento di tempo; e perciò i due pendoli dovranno pervenire nel medesimo istante al punto A, ed eguali tempi ancora dovranno impiegare per salire l'uno in C e l'altro in C'. Donde si rileva che le oscillazioni di uno stesso pendolo per gli archi BC e B'C' avranno la medesima durata.

Questa indipendenza della durata delle oscillazioni per archi minimi dalla grandezza dell'arco costituisce l'*isocronismo* di un pendolo. Galilei, ancor giovinetto, la scovriva osservando le oscillazioni di una lampada nella chiesa primaziale di Pisa; e con questa stupenda invenzione dava il cronometro all'Astronomia, alla Fisica il misuratore della gravità, ed alla Geologia un mezzo di pronto ed esteso scandaglio.

Dipendenza della durata di un'oscillazione dalla lunghezza del pendolo e dal valore della gravità.

45. Dall'espressione $g sen \alpha$ della forza acceleratrice di un pendolo è facile dedurre che per una data ampiezza la durata dell'oscillazione sarà direttamente proporzionale alla radice 2ª della lunghezza del pendolo ed inversamente all'analoga radice del valore di g. Ed in vero per due pendoli OB ed OB' (Fig. 47) sospesi allo stesso punto O ed allontanati dalla verticale per uno stesso angolo BOC $=\alpha$, potremo riguardare come rettilinei i due archetti Bs e B's' corrispondenti all'angolo BOs, abbastanza piccolo perchè vi si possa riguardare come costante il valore di $g sen \alpha$; e perciò chiamando θ e θ' i tempi in cui i due pendoli percorreranno Bs e B's', avremo (n° 41):

$$\theta : \theta' = \sqrt{Bs} : \sqrt{B's'}.$$

Ma abbiamo ancora:

$$Bs : B's' = OB : OB';$$

dunque, chiamando l ed l' le lunghezze dei due pendoli, sarà:

$$\theta : \theta' = \sqrt{l} : \sqrt{l'}.$$

E la stessa relazione dovendo aver luogo tra le rispettive durate pei successivi elementi degli archi BC e B'C' e quindi dei loro doppii BD e B'D', avremo che chiamando t_1 e t'_1 i tempi delle due oscillazioni, sarà:

$$t_1 : t'_1 = \sqrt{l} : \sqrt{l'}.$$

Daltronde applicando la formola $s = \frac{1}{2} g \frac{a}{l} t^2$ del n° 41 a ciascuno degli elementi dell'arco BC, troveremo che il tempo in cui ciascun di essi sarà percorso, e quindi il tempo di un'in-

tera oscillazione, sarà inversamente proporzionale a $\sqrt{g}$. E perciò se per due pendoli riguarderemo come diversi i valori di l e g, le durate t e t' delle loro oscillazioni per una medesima ampiezza α dovranno render soddisfatta la proporzione:

$$t:t'=\sqrt{\frac{l}{g}}:\sqrt{\frac{l'}{g'}}.$$

Quindi per un pendolo solo si avrà:

$$t=m\sqrt{\frac{l}{g}},$$

m indicando un fattore che in generale sarà funzione di α. Ma poichè di ordinario le oscillazioni dei pendoli s'intendono attuate per archi che rendano soddisfatta la condizione dell'isocronismo, così noi cercheremo il valore di m nell'ipotesi di t indipendente da α [1].

Consideriamo il pendolo OB, che allontanato dalla verticale per l'angolo $BOC=\alpha$, ha poi descritto in un certo tempo l'angolo $BOs=x$; e la velocità v che esso avrà nel punto s, dovendo pareggiar quella che avrebbe acquistata scendendo per l'altezza hz, sarà espressa dall'equazione:

$$v=\sqrt{2g.hz}.$$

Ma ponendo il raggio $OB=l$, si ottiene:

$$hz=l[\cos(\alpha-x)-\cos\alpha];$$

e d'altronde [2] si ha la relazione:

[1] In generale il valore del fattore m è dato dall'equazione:

$$m=\pi\left[1+\left(\frac{1}{2}\right)^2\cdot\frac{h}{2a}+\left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2\cdot\left(\frac{h}{2a}\right)^2+\ldots+\left(\frac{1.3..(2n-1)}{2.4........2n}\right)^2\cdot\left(\frac{h}{2a}\right)^n\right],$$

nella quale h rappresenta la freccia dell'arco di oscillazione, ed a la lunghezza del pendolo. Quando poi l'arco di oscillazione è così piccolo da soddisfare la condizione dell'isocronismo, allora il fratto $\frac{h}{2a}$ si ritiene come nullo, e l'equazione precedente diviene $m=\pi$. Ved. i miei ELEMENTI DI MECCANICA RAZIONALE a pag. 356 e seg.

[2] Vedi i miei ELEMENTI DI TRIGONOMETRIA RETTILINEA E SFERICA a pag. 25.

$$\cos(\alpha-x)-\cos\alpha=2\,sen\frac{2\alpha-x}{2}.sen\frac{x}{2},$$

che nell'ipotesi di α abbastanza piccolo, diviene:

$$\cos(\alpha-x)-\cos\alpha=(2\alpha-x)\frac{x}{2}.$$

Quindi sostituendo avremo:

$$hz=l(2\alpha-x)\frac{x}{2},$$

e
$$v=\sqrt{gl(2\alpha-x)x}.$$

Or immaginiamo l'arco BCD=$2l\alpha$ (Fig. 47) disteso nella retta BCD (Fig. 48), sulla quale sia descritta la semicirconferenza BED. Immaginiamo inoltre due mobili, M ed M_1, che partano contemporaneamente dal punto A ; il primo movendo pel diametro BD con tutte le fasi di velocità che han luogo nel moto del pendolo OB per l'arco BCD (Fig. 47), ed il secondo per la semicirconferenza BED e con tale movimento da trovarsi sempre con M sopra una stessa perpendicolare al diametro. È chiaro che quest'ultima condizione sarà soddisfatta , se la componente, parallela al diametro , della velocità di M_1 si trovi costantemente eguale alla velocità di M. Così i due mobili si troveranno quasi che trasportati da una perpendicolare al diametro, e percorreranno nel medesimo tempo , l'uno il diametro BD e l'altro la semicirconferenza BED.

Ma se $\sqrt{gl(2\alpha-x)x}$ dev'esser la componente secondo EK della velocità w che il mobile M_1 ha nel senso della tangente EH, sarà:

$$w=\frac{\sqrt{gl(2\alpha-x)x}}{\cos \mathrm{HEK}}.$$

E poichè:

$$\cos\mathrm{HEK}=\cos\mathrm{CE}s=\frac{\mathrm{E}s}{\mathrm{EC}},\ \mathrm{EC}=l\alpha,$$

ed
$$\mathrm{E}s=\sqrt{\mathrm{B}s.\mathrm{D}s}=\sqrt{lx.l(2\alpha-x)}=l\sqrt{(2\alpha-x)x}.$$

sostituendo avremo:

$$w=\frac{\alpha\sqrt{gl(2\alpha-x)x}}{\sqrt{(2\alpha-x)x}}=\alpha\sqrt{gl}.$$

La velocità w sarà dunque costante, ed M_1 percorrerà la semicirconferenza con moto uniforme. V'impiegherà perciò un tempo che sarà dato dal quoziente dello spazio $\pi l\alpha$ diviso per la velocità $\alpha\sqrt{gl}$. Ma lo stesso tempo deve ancora impiegare il pendolo OB per correre tutto l'arco BCD; dunque chiamando t questo tempo, si avrà:

1. $$t=\frac{\pi l\alpha}{\alpha\sqrt{gl}}=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\,;$$

e così troviamo il fattore $m=\pi$, quando l'ampiezza dell'oscillazione è abbastanza piccola perchè nell'espressione della forza acceleratrice $g\,sen\,\alpha$ si possa sostituire l'arco α al suo seno [1].

46. Nel determinare la relazione $t=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ non essendosi considerata altra forza acceleratrice che la gravità del corpo sospeso al filo, questo si è riguardato come privo di peso. Si è supposto inoltre che tutte le particelle del corpo avessero una stessa distanza l dall'asse di rotazione; e ciò è concepibile nel solo caso che il corpo sospeso sia ridotto ad un atomo. La formola dunque suppone che il pendolo consista in un atomo pesante sospeso ad un filo senza peso. Questo pendolo, di cui non può esistere che l'idea, è denominato *pendolo semplice*. Pendolo semplice e composto.

Ogni pendolo attuabile è *pendolo composto*, ossia formato da tanti pendoli semplici, quante sono le molecole del sistema da cui risulta. Immaginiamo a modo di esempio che il pendolo consista in una verga parallelepipéda AB (Fig. 49) mobile intorno ad un asse proiettato in O. Facendoci a considerare le molecole della verga, che come m, m' ecc. sono a diverse distan-

[1] Questa pregevolissima dimostrazione della formola $t=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ è dovuta al sig. Kulik

ze dall'asse di rotazione, troveremo per mezzo della formola $t=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ che esse tenderanno a prendere nelle oscillazioni della verga una celerità diversa, che sarà maggiore per quelle che sono più vicine all'asse di rotazione, e minore per quelle che ne sono più lontane. Ma poichè, riunite in un corpo solido, esse sono costrette ad andar sempre insieme, così pel fatto della loro unione le molecole più vicine all'asse dovranno rallentare il loro moto, e quelle che ne distano maggiormente dovranno accelerarlo. Vi sarà dunque intermedia ad esse una qualche molecola che non sarà costretta a dover variare la sua celerità; e che in conseguenza oscillando come se fosse sola, avrà tanta distanza dall'asse, quanta è la lunghezza che bisognerebbe dare ad un pendolo semplice perchè andasse sempre insieme al dato pendolo composto. Il luogo che vi occupa la molecola non costretta a variare la sua celerità, si denomina *centro di oscillazione.*

Determinazione del centro di oscillazione.

47. Per mostrare la possibilità di definire il luogo del centro di oscillazione di un dato corpo, facciamoci primieramente a considerare la velocità di rotazione che esso prenderebbe intorno ad un asse fisso per azione di una data forza. Poniamo, per eliminare l'intervento della gravità, che il corpo abbia il suo centro di gravità sull'asse di rotazione O (Fig. 50). Rappresenti m una delle sue molecole; e condotta la Om normale all'asse, chiamiamo θ l'angolo da esso descritto nell'unità di tempo: sarà $r\theta$ lo spazio percorso nello stesso tempo della molecola m col raggio $Om=r$; il prodotto $\mu r\theta$ della sua massa μ per la velocità $r\theta$ n'esprimerà la forza, ed il momento di questa sarà $\mu r^2\theta$. Prendendo la somma degli analoghi momenti di tutte le molecole del corpo, somma ch'esprimeremo col simbolo $\Sigma\mu r^2\theta=\theta\Sigma\mu r^2$, avremo il momento risultante (n° 27) di tutte le forze possedute dal corpo nell'atto della rotazione; quindi se un egual momento gli fosse comunicato in opposta direzione, il corpo dovrebbe tornare al riposo. Or chiamando F l'intensità della forza produttrice della rotazione del corpo ed a la distanza della sua direzione dall'asse, è chiaro che sarà:

$$Fa = \theta\Sigma\mu r^2, \text{ donde } \theta = \frac{Fa}{\Sigma\mu r^2}.$$

L'angolo θ pel quale il corpo rota nell'unità di tempo, dicesi *celerità angolare*; e la somma $\Sigma\mu r^2$ dei prodotti delle masse molecolari pei quadrati delle loro distanze dall'asse di rotazione ha ricevuto il nome di *momento d'inerzia* del corpo rispetto a quel dato asse.

Ciò posto, immaginiamo che il corpo AB (Fig. 49) mobile intorno all'asse A, sia allontanato dalla verticale Ak per l'angolo B$\mathrm{A}k = \varphi$. Ponendo che il centro di gravità del corpo sia nel punto g la cui distanza dall'asse di rotazione facciamo $= a$, ed indicando con M la sua massa e quindi con Mg il suo peso, sarà $Mga \operatorname{sen}\alpha$ il momento della forza che lo spingerà a tornare alla sua posizione di equilibrio. Sostituendo questa esprèssione ad Fa nell'equazione precedente, avremo che il corpo comincerà a discendere colla celerità angolare:

$$\theta = \frac{Mga \operatorname{sen}\alpha}{\Sigma\mu r^2}.$$

Or se il centro di oscillazione del corpo è nel punto c, il pendolo semplice che avesse la lunghezza $\mathrm{A}c = l$ sarebbe sincrono al pendolo AB, e quindi comincerebbe il suo moto colla stessa celerità angolare θ. Ma la formola precedente applicata al pendolo Ac diviene:

$$\theta = \frac{\mu l g \operatorname{sen}\alpha}{\mu l^2} = \frac{g \operatorname{sen}\alpha}{l};$$

sarà dunque:

$$\frac{Mga \operatorname{sen}\alpha}{\Sigma\mu r^2} = \frac{g \operatorname{sen}\alpha}{l},$$

donde:

$$l = \frac{\Sigma\mu r^2}{Ma}.$$

Vale a dire che la distanza del centro di oscillazione dall'asse di rotazione, ossia la lunghezza del pendolo semplice sincrono

ad un dato pendolo composto, sarà data dal quoziente del momento d'inerzia $\Sigma\mu r^2$ diviso pel momento statico Ma.

Determinazione sperimentale di Ma e $\Sigma\mu r^2$.

48. Abbiamo veduto nel n° 36 come si possa determinare sperimentalmente la posizione del centro di gravità di un corpo; e quando questa sia nota, sapremo subito il valore del suo momento statico Ma. Ma potremo procedere in un altro modo. Poniamo che sia AB (Fig. 51) il corpo di cui si voglia conoscere il momento statico rispetto all'asse di rotazione c. Si faccia passare per la gola della girella M un filo di cui un capo sia attaccato alla estremità inferiore del corpo AB, e dall'altro capo penda un peso Q. Così il corpo verrà allontanato di un certo angolo α dalla verticale di equilibrio; e ponendo che in g sia il centro di gravità del corpo e che la cn sia perpendicolare alla direzione BM del filo, avremo che i due momenti opposti $P.mc$ e $Q.nc$ si faranno equilibrio. Ma:

$$cm = cg.sen\,\alpha = a.sen\,\alpha\ ;$$

sarà dunque:

$$Pa\,sen\,\alpha = Q.nc\ ,$$

donde:

$$Pa = \frac{Q.nc}{sen\,\alpha}.$$

Quanto poi alla valutazione numerica del momento d'inerzia $\Sigma\mu r^2$ essa è in generale un problema di Calcolo superiore; ma del pari che quella del momento statico Pa, in parecchi casi si otterrà facilmente per via d'esperienze. Rappresenti AB (Fig. 52) una spranga parallelepipeda, che può oscillare intorno all'asse c. Indicando con x il momento d'inerzia della spranga rispetto all'asse di rotazione e con K il suo momento statico, avremo per le cose anzidette che la durata t di una sua oscillazione sarà data dall'equazione:

2. $$t = \pi\sqrt{\frac{x}{Kg}}.$$

Or supponiamo la spranga gravata delle due masse eguali m_1 ed m_2 situate ad eguali distanze dall'asse di rotazione c, ed aven-

ti forme lenticolari assai depresse affinchè i loro momenti di inerzia fossero sensibilmente eguali ai prodotti dei loro pesi pei quadrati delle distanze dei loro centri di gravità dall'asse di rotazione. Indicando con δ queste due distanze eguali e con P la massa di ciascuna lente, il momento d'inerzia del sistema diverrà $x+2P\delta^2$; e poichè l'aggiunzione delle due lenti ha prodotto nel sistema i due momenti statici eguali ed opposti $P\delta$ e $-P\delta$, così il momento K resterà invariato, e la durata di un'oscillazione del nuovo pendolo sarà data dall'equazione:

$$t_1=\pi\sqrt{\frac{x+2P\delta^2}{Kg}}. \qquad (3)$$

L'eliminazione di Kg dalle equazioni 2 e 3 ci darà il richiesto momento d'inerzia:

$$x=\frac{2P\delta^2t^2}{t_1^2-t^2}.$$

49. A rendere meno influenti gli errori inevitabili nella determinazione dei momenti Ma e $\Sigma\mu r^2$ giova che si dia al pendolo composto una forma che si approssimi ad attuare il concetto di un pendolo semplice. Così il pendolo adoperato da Borda nelle sue ricerche componevasi di una palla di platino sospesa ad un filo metallico. Mercè la massima densità del platino l'effetto della resistenza dell'aria diveniva assai piccolo; ed a rendere anche minimo l'attrito, si adoperava come asse di rotazione lo spigolo di un prisma triangolare di durissimo acciaio poggiato sopra un piano ben levigato di pietra dura. In questo modo si provvedeva a conservare il moto del pendolo per lungo tempo. Pendoli di Borda e di Kater.

Rispetto poi al pendolo adoperato dal Capitan Kater in Inghilterra e che porta il suo nome, quantunque fosse stato già prima proposto dal Bohnenberger in Germania, si ha la corrispondente lunghezza del pendolo semplice senza che siavi bisogno di conoscere i due momenti Ma e $\Sigma\mu r^2$; e ciò in conseguenza di una notevole proprietà di cui gode il centro di oscillazione, e che ora ci facciamo a brevemente dichiarare.

Siano A e B (Fig. 53) due assi paralleli, di cui il secondo passi pel centro di gravità di un dato corpo. Supponiamo che sia noto il momento d'inerzia S del corpo rispetto all'asse B, e che si voglia il momento S_1 dello stesso corpo rispetto all'asse A. Sia M il luogo occupato da una molecola del corpo; e nel piano che pel punto M va condotto perpendicolare agli assi A e B siano menate le rette MC, MD e la ME perpendicolare a CD. Sarà:

$$\overline{MC}^2 = \overline{CE}^2 + \overline{ME}^2 = CD^2 + 2CD.DE + \overline{MD}^2;$$

e di questa equazione moltiplicati i due membri per la massa μ di una molecola del corpo, e prese le somme degli analoghi prodotti, si avrà:

$$\Sigma\mu.\overline{MC}^2 = \Sigma\mu.\overline{CD}^2 + 2CD\Sigma\mu.DE + \Sigma\mu.\overline{MD}^2.$$

Ma $\Sigma\mu.\overline{CM}^2$ rappresenta il momento d'inerzia S_1 rispetto all'asse A, e $\Sigma\mu.\overline{MD}^2$ l'analogo momento rispetto all'asse B; è inoltre $\Sigma\mu =$ alla massa M del corpo, e la somma $\Sigma\mu.DE$ dei momenti statici delle molecole rispetto all'asse B (nº 28) è nulla; perciò ponendo la distanza degli assi $CD = k$, l'equazione precedente diverrà:

$$S_1 = S + Mk^2.$$

Or se la retta A rappresenti l'asse intorno a cui potrà oscillare il dato corpo AB (Fig. 49), la distanza $Ac = l$ del suo centro di oscillazione sarà data dal quoziente di S_1 diviso pel momento statico Mk; quindi avremo:

4. $$l = \frac{S + Mk^2}{Mk} = k + \frac{S}{Mk},$$

donde: $$l - k = \frac{S}{Mk}.$$

Ponendo $l - k = k_1$, avremo $kk_1 = \frac{S}{M}$; e togliendo da questa

il valore di k e sostituendolo nel 2° membro dell'equazione 4, ne risulterà:

$$k+\frac{S}{Mk}=k_1+\frac{S}{Mk_1}.$$

Ma $k_1=l-k=Ac-Ag=cg$; dunque se l'asse di rotazione sia trasportato parallelamente a se stesso da A nel centro di oscillazione c, questo viceversa si troverà traslocato in A. E perciò se ad un pendolo composto siano fermati due assi paralleli in modo che la durata dell'oscillazione resti invariata, a qualunque degli assi il pendolo si sospenda, la loro distanza segnerà la lunghezza del pendolo semplice sincrono al dato pendolo composto.

Su questo principio è fondata la costruzione del pendolo di Kater. Si compone di una verga metallica di forma parallelepipeda (Fig. 54) avente in c e c' due coltelli di sospensione, ed è provveduta di due masse addizionali m ed m' scorrevoli a modo di anelli. Sospeso il pendolo pel coltello c, si contino le oscillazioni che farà in un dato tempo; indi si capovolga, si sospenda pel coltello c', e rimesso in moto si prenda nota delle oscillazioni eseguite in un tempo eguale al primo. Se i due numeri di oscillazioni risultassero per avventura eguali, il pendolo sarebbe sincrono al pendolo semplice che avesse la lunghezza cc'; ma se le quantità di oscillazioni sono diverse, allora si ridurranno all'eguaglianza mercè lo spostamento delle masse m ed m'. Il metodo di Kater sta dunque nel far variare la forma di un pendolo composto fino a renderlo sincrono ad un pendolo semplice di data lunghezza.

50. Dalla stessa equazione 4 del n° precedente si hanno ancora le seguenti importanti conseguenze: Relazione tra le distanze dei centri di gravità e di oscillazione dall'asse di rotazione.

— 1ª. Essendo $l=k+\frac{S}{Mk}$, è chiaro che il centro di oscillazione sarà sempre più lontano dall'asse di rotazione che il centro di gravità.

— 2ª. Ponendo che di un corpo si conosca la massa M ed

il suo momento d'inerzia $\Sigma\mu r^2$ rispetto ad un dato asse, potremo sempre stabilire l'equazione $\Sigma\mu r^2 = Mh^2$, e quindi dedurne il valore di h, che dicesi *braccio d'inerzia*. Laonde se il momento $\Sigma\mu r^2$ sia stato preso rispetto ad un asse condotto pel centro di gravità del corpo parallelamente a quello di sospensione, l'equazione 4 assumerà la forma:

5. $$l = k + \frac{h^2}{k},$$

nella quale ponendo $k=h$, si avrà $l=2h$. Vale a dire che se il centro di gravità del corpo è lontano dall'asse di rotazione quanto è il braccio d'inerzia, il centro di oscillazione ne disterà per due volte tanto.

Or il valore $l=2h$ rappresenta la minima distanza che potrà esservi tra il centro di oscillazione e l'asse di sospensione di un dato corpo. Ed in vero, consideriamo il caso di una palla omogenea sospesa ad un filo, il cui peso sia trascurabile rispetto a quello della palla. Determinando in questa ipotesi $\Sigma\mu r^2$ per mezzo del Calcolo superiore [1], si troverà $h=a\sqrt{\frac{2}{5}}$, a indicando il raggio della palla. Quindi ponendo $a=2$, si avrà $h=2\sqrt{\frac{2}{5}}=1,26$, ed il minimo valore di l sarà espresso da $l=2,52$.

E per mostrare che $k=h$ rende minimo il valore di l, poniamo nell'equazione 5 due valori di k, l'uno maggiore e l'altro minore di h; poniamo, per esempio, una volta $k=2$, un'altra $k=1$. Avremo nel 1° caso:

$$l=2+\tfrac{8}{5}:2=2,8,$$

e nel secondo: $$l=1+\tfrac{8}{5}:1=2,6;$$

valori entrambi più grandi di $l=2,52$ ottenuto nell'ipotesi di $k=h$.

Quindi si comprende come rendendo piccolissima la distanza del centro di gravità di un pendolo dall'asse di rotazione si possa ottenere un grande valore per l ed in conseguenza un'o-

[1] Ved. la mia MECCANICA RAZIONALE a pag. 410.

scillazione assai lenta. E così vien chiarita la regola data a pag. 45 per dedurre dalla maggiore o minor lentezza delle oscillazioni di una bilancia, il grado di prossimità del centro di gravità del giogo all'asse di rotazione.

— 3ª. Il centro di oscillazione si confonderà prossimamente col centro di gravità, quando la distanza di questo punto dall'asse di rotazione sia grandissima rispetto alle dimensioni del corpo. Prendiamo ad esempio una palla di platino pesante 500 grammi, e perciò del raggio di centimetri 2,832 [1], ed il cui centro sia di 3 metri distante dall'asse di rotazione. Ponendo $h^2 = \frac{2}{5} \cdot 2{,}832^2 = 3{,}208$ nell'equazione 5, avremo:

$$l = \text{cent. } 300 + \frac{3{,}208}{300} = \text{met. } 3{,}000107.$$

Vale a dire che prendendo il centro di gravità della palla per centro di oscillazione, si fa un errore poco più grande di un decimo di millimetro.

51. Dato che di ogni pendolo composto si può determinare la lunghezza l del pendolo semplice che lo pareggia in durata di oscillazione, e sapendo che questa durata varia in ragion diretta della radice quadrata di l (nº 47); ne segue che conoscendo sperimentalmente la durata t di un'oscillazione per un dato valore di l, potremo mercè la sola regola del tre determinare la lunghezza l_1 del pendolo che batterebbe i secondi. Ed allora ponendo $l = l_1$ e $t = 1^s$, l'equazione 1 ci darà: Misura della gravità.

$$1 = \pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}, \text{ donde } g = \pi^2 l_1.$$

Vale a dire che il valore di g, ossia (nº 38) la velocità acquistata da un grave nel 1º minuto secondo della sua caduta ver-

[1] Questo valore risulta dall'equazione:

$$\frac{500}{21} = \frac{4}{3} \pi x^3,$$

in cui x indica il raggio della palla, e 21 il peso specifico del platino.

ticale in uno spazio voto, sarà dato dal prodotto del quadrato del rapporto π della circonferenza al diametro, moltiplicato per la lunghezza l_1 del pendolo semplice che ivi batterebbe i secondi. Così dalle ricerche istituite primieramente da Borda nel 1790, indi da Biot, Bouvard e Mathieu nel 1808, ed infine da Humboldt ed Arago nel 1818 si è rilevato che per Parigi si ha:

$$l_1 = 993{,}86 \text{ millimetri e } g = 9{,}809 \text{ metri.}$$

Questa indicazione di luogo che accompagna i valori di l_1 e g, accenna ad una variazione nella forza di gravità secondo il diverso punto di osservazione; e nei n[i] seguenti vedremo che realmente la gravità è una certa funzione del punto di osservazione. Riguardando per ora questa variazione come una semplice possibilità, poniamo che un pendolo di lunghezza costante, trasportato in due luoghi diversi, oscilli con diversa celerità. Indicando con t e t' le durate di oscillazione e con g e g' le corrispondenti energie della gravità, avremo dall'equazione 1:

$$t : t' = \frac{1}{\sqrt{g}} : \frac{1}{\sqrt{g'}} = \sqrt{g'} : \sqrt{g}.$$

Ma se N ed N' disegnano le quantità di oscillazioni fatte dal pendolo nei due luoghi durante uno stesso tempo T, avremo:

$$t = \frac{T}{N},\ t' = \frac{T}{N'};$$

e questi valori sostituiti nella proporzione precedente, ci daranno:

$$\sqrt{g} : \sqrt{g'} = \frac{1}{N'} : \frac{1}{N} = N : N',$$

donde:

$$g : g' = N^2 : N'^2.$$

Vale a dire che le energie della gravità in luoghi diversi sono proporzionali ai quadrati dei numeri di oscillazioni che uno stesso pendolo ivi farà in tempi eguali.

Variazione 52. Il primo fatto, che ha dimostrato la gravità variare se-

condo la latitudine del luogo, è stato osservato nel 1672 dall'astronomo francese Richer nell'isola di Cayenna. Il pendolo, che a Parigi batteva i secondi, trasportato in Cayenna ritardava di $2^m,28^s$ al giorno. Questo ritardo o era prodotto da un allungamento del pendolo, o da diminuzione della gravità. La prima ipotesi era inammisibile, poichè (come vedremo nella teorica del calore) il clima di Cayenna assai più caldo di quello di Parigi, non avrebbe potuto al massimo far ritardare il pendolo che di una decina di secondi al giorno; bisognava dunque ammettere necessariamente che la gravità a Cayenna sia minore che a Parigi.

della gravità secondo la latitudine.

In questo fatto osservato da Richer, e che eccitò la meraviglia di tutti i fisici di quel tempo, Huygens vide un effetto immediato della rotazione diurna della terra.

Immaginiamo che un mobile A (Fig. 55), ligato ad un filo inestensibile fermato in O, riceva secondo la AB perpendicolare ad AO un impulso che gli farebbe percorrere in un tempo piccolissimo la AC se fosse libero. Obbligato dal filo a camminare per l'arco circolare AD, è chiaro che questo moto non può essere che l'effetto di una componente della forza tangenziale AC, di cui l'altra componente sarà distrutta dalla resistenza del filo. E poichè la seconda componente dovrà agire secondo il prolungamento AE del raggio OA, così per ottenere le grandezze delle due componenti, basterà condurre pel punto C la CD parallela ad AE e la CE parallela all'arco AD che per la sua piccolezza si confonderà colla sua corda.

La componente AE della forza tangenziale AC, distrutta dalla resistenza del filo, o da qualunque altra cagione che obbligasse il mobile a camminare per la circonferenza del cerchio o per qualsiasi curva, si denomina *forza centrifuga*. E della sua esistenza in ogni moto curvilineo possiamo averne chiarissima pruova per mezzo di un assai semplice sperimento. Leghiamo ad una cordicella una piccola secchia in parte piena di acqua e meniamola in giro a guisa di fionda: vedremo l'acqua non cadere, quando la secchia girando volgerà il suo fondo in alto. Una forza dunque ha continuamente spinta

l'acqua contro il fondo della secchia e questa forza è appunto la centrifuga.

Prendendo AF=CD, ed essendo l'arco AD prossimamente eguale alla sua corda, avremo per una nota proprietà del cerchio la proporzione:

$$AF : AD = AD : 2R,$$

R indicando il raggio del cerchio; quindi

$$AE = AF = \frac{\overline{AD}^2}{2R}.$$

Ma, come vedremo nel Capo seguente, il mobile A dovrà percorrere la circonferenza con moto uniforme; quindi chiamandone v la velocità e θ il tempo in cui percorrerà l'arco AD, avremo:

$$D = v\theta;$$

e questo valore sostituito nell'equazione precedente, ci darà

$$AE = \frac{v^2\theta^2}{2R}.$$

Or AE rappresentando lo spazio che il mobile A percorrerebbe per l'azione della forza centrifuga nello stesso tempo in cui compie il cammino AD, avremo (n° 38), indicando con φ l'energia di detta forza,

$$AE = \tfrac{1}{2}\varphi\theta^2;$$

dalle quali due equazioni eliminando AE, risulta:

$$\varphi = \frac{v^2}{R}.$$

Vale a dire che la forza centrifuga è in ragion diretta del quadrato della velocità e nell'inversa del raggio del circolo descritto.

Inoltre chiamando T il tempo impiegato dal mobile in percorrere la circonferenza ADH $= 2\pi R$, si avrà (n° 10):

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

ed in conseguenza:

$$\varphi=\frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Dunque la forza centrifuga è ancora direttamente proporzionale al raggio del cerchio che il mobile descrive, ed inversamente al quadrato del tempo periodico.

Premesse queste nozioni sul moto circolare, torniamo al fatto osservato da Richer. Rappresenti AB (Fig. 56) l'asse di rotazione della terra, CD ne sia l'equatore, ed ABCD un meridiano su cui consideriamo il punto m situato alla latitudine $COm=\lambda$. Indicando con T la durata della rotazione del nostro pianeta e con r il raggio pm del parallelo che passa pel punto m, avremo per questo parallelo la forza centrifuga:

$$\varphi=\frac{4\pi^2 r}{T^2}=\frac{4\pi^2 R\cos\lambda}{T^2},$$

dinotando con R il raggio terrestre Om. Or questa forza essendo diretta secondo il prolungamento ms del raggio pm, farà col raggio terrestre Om, e quindi colla direzione della gravità, l'angolo $smt=\lambda$; in conseguenza la sola componente $mt=\varphi\cos\lambda$ si troverà opposta all'azione della gravità, mentre la componente tangenziale $mz=\varphi\,sen\lambda$ spingerà il punto m verso l'equatore. E poichè per la latitudine λ si ha $\varphi=\frac{4\pi^2 R\cos\lambda}{T^2}$; così avremo la componente:

$$mt=\frac{4\pi^2 R\cos^2\lambda}{T^2}.$$

Pel fatto dunque della rotazione diurna la gravità terrestre soffre una diminuzione proporzionale al quadrato del coseno della latitudine, e perciò la gravità effettiva dovrà essere decrescente dai poli all'equatore, essendo la forza centrifuga nulla nei poli e massima nell'equatore. Quindi a Cayenna, che dista di soli 5 gradi della linea equinoziale, doveva trovarsi necessariamente una gravità minore che a Parigi che ne dista di 48°,50'.

Depressione polare.

53. La sfericità dei globetti di mercurio, delle gocce di acqua ecc. ci fa vedere come le masse liquide, non turbate da forze esterne, tendano a prendere nel loro equilibrio definitivo una forma sferica. Or i pianeti hanno tutti una figura rotonda; dunque in un'epoca assai remota la materia dei pianeti ha dovuta esser fluida. Ma se essa è stata tale, la rotazione, che si è riconosciuta in tutti i pianeti, ha dovuta accumulare la materia verso i loro equatori a scapito di quella esistente nei poli; e ciò per mezzo della componente tangenziale mz (Fig. 56) della forza centrifuga generata dal fatto della loro rotazione. Questa conseguenza si è verificata rispetto al globo terrestre misurando i gradi del meridiano a diverse latitudini, ed in realtà si è trovato che i gradi polari sono più grandi degli equatoriali; e quanto agli altri pianeti la depressione ai poli è risultata dalla misura dei loro diametri apparenti. Intanto a viemeglio rifermare l'esattezza della deduzione teoretica gioverà osservare che lo schiacciamento ai poli si è trovato più sensibile nei pianeti che hanno più celere rotazione: così la differenza è appena di $\frac{1}{300}$ tra i diametri polare ed equatoriale della terra che compie la sua rotazione in 24 ore, mentre l'analoga differenza si eleva a circa $\frac{1}{14}$ nel pianeta Giove che assolve il suo moto rotatorio in poco più di 9 ore.

Variazione della gravità in ragione della distanza dal centro della terra.

54. Dalle cose esposte nel n° 52 si rileva che la luna, girando intorno alla terra, deve gravitare verso di questa come ogni corpo terrestre. Rappresenti O (Fig. 55) il centro della terra ed A quello della luna in un certo istante del tempo. Se allora (ponendo che sia AD l'arco descritto dalla luna in un minuto) la sua forza tangenziale AC venisse distrutta, essa cadrebbe verso la terra, descrivendo in egual tempo lo spazio AF, uno verso dell'arco AD. Or conoscendo il tempo periodico della luna e la distanza AO, che nel suo valore medio è di 60 raggi terrestri, si troverà essere $AF = 4^m,904$, ch'è precisamente il valore di $\frac{1}{2}g$ dato nel n° 51, ossia dello spazio che un grave cadendo nel voto percorrerebbe in un secondo. E poichè la legge degli spazii proporzionali ai quadrati dei tempi (n° 38) ci fa conoscere che il cammino del grave in un mi-

nuto sarebbe di $4^m,904.60^2$, così avremo che gli spazii percorsi durante il primo minuto della loro libera caduta da due gravi, l'uno che movesse dalla distanza di 60 raggi dal centro terrestre e l'altro da quella di un solo raggio, sarebbero nella ragione di $1:60^2$; vale a dire nella ragione inversa dei quadrati delle loro distanze dal centro della terra. Ma la ragione di questi spazii è la stessa che quella dei corrispondenti valori della gravità terrestre; dunque mercè il moto della luna noi conosciamo che la forza di gravità varia in ragione inversa dei quadrati delle distanze dal centro terrestre.

Or le altezze, a cui possono estendersi i nostri sperimenti, essendo sempre frazioni presso che infinitesime del raggio terrestre, si comprende come l'ipotesi di una gravità costante (nº 38) abbia potuto trovarsi di accordo coi risultamenti ottenuti sì col piano inclinato di Galilei che colla macchina di Atwood.

CAPO QUARTO.

GRAVITAZIONE UNIVERSALE.

Cenno storico. 55. L'idea che i corpi celesti tendano gli uni verso gli altri, come i gravi verso la terra, risale fino ad Anassagora, il quale insegnava che le stelle ed i pianeti sono corpi pesanti, la cui caduta è impedita dal loro movimento circolare; ma che se questo venisse a cessare, essi cadrebbero immediatamente: pensiero sublime, che surto in un tempo in cui non esisteva neppur l'idea di Meccanica razionale, ci mostra di quanta penetrazione fosse dotato l'intelletto che lo concepiva. È noto ancora che sulla pesantezza degli atomi poggiavano le cosmogonie di Democrito ed Epicuro. E quando, dopo il risorgimento delle scienze, Copernico completava l'idea pitagorica sul vero ordinamento del sistema planetario, egli vide nella gravità una forza insita agli atomi della materia e cagione della rotondità dei pianeti. « Veramente, egli dice (*De Revolut. orbium coelest.*), io stimo la gravità non esser altra cosa che una certa naturale appetenza imposta alle parti dalla divina provvidenza del Fattore dell'Universo, affinchè facciano un tutto riunendosi in forma di globo. Ed è da credersi che la stessa affezione sia nel sole, nella luna ed in tutti gli altri pianeti, e che per essa si conservino in quella rotondità con cui appariscono ».

Kepler spinse più innanzi le sue vedute. « La gravità, egli dice (*De stella Martis*), non è che un'affezione materiale e mutua dei corpi, per la quale essi tendono di unirsi ».

« La gravità dei corpi non è diretta verso il centro del mondo, ma verso quello del corpo rotondo di cui fanno parte; e se la terra non fosse sferica, i gravi situati nei diversi punti della sua superficie, non cadrebbero affatto verso un medesimo centro ».

« Due corpi isolati si porterebbero l'uno verso l'altro, come due calamite, percorrendo, per unirsi, degli spazii reciprocamente proporzionali alle loro masse. Se la terra e la luna non fossero rattenute nella distanza, che le separa, da una forza animale o da altra equivalente, esse cadrebbero l'una sull'altra; e nell'ipotesi che sieno egualmente dense, la luna farebbe i $\frac{53}{54}$ del cammino, ed il resto sarebbe percorso dalla terra ».

« Se la terra cessasse di attrarre le acque dell'oceano, queste si porterebbero sulla luna in virtù della forza attrattiva di questo astro. Questa forza che si estende fino alla terra, vi produce il fenomeno del flusso e riflusso del mare ».

Fino a questo punto la storia non ci presenta che semplici divinazioni di un sistema di gravitazione universale; senza che questo principio si facesse intervenire come elemento della cagione produttrice dei movimenti planetarii. La prima opera, in cui si trovi espressa un'idea di relazione tra i movimenti dei pianeti e la loro gravità sì verso il sole che tra se stessi, è quella che fu pubblicata dall'astronomo inglese Hook sotto il titolo: *An attempt to prove the motion of the earth*; e nella quale si leggono le seguenti rimarchevoli proposizioni:

« Io spiegherò un sistema del mondo sotto molti riguardi differente da tutti gli altri, e che si fonda sulle tre seguenti proposizioni — 1ª Che tutti i corpi celesti non solamente hanno un'attrazione o gravitazione verso il loro centro, ma si attirano a vicenda nella loro sfera di attività — 2ª Che tutti i corpi i quali hanno un moto semplice e diretto, continuerebbero a muoversi in linea retta, se qualche altra forza non li deviasse continuamente e non li costringesse a descrivere un cerchio, un'ellissi o altra curva più composta — 3ª Che l'attrazione è tanto più intensa, quanto il corpo attirante è più vicino ».

E quanto alla diminuzione della gravità in ragione della distanza dal centro attraente, Hook diceva che bisognava meditarla e farne obbietto di speciale ricerche, a cui egli non aveva potuto dedicarsi; ma che la sua idea meritava di esser seguita, e che grande utilità ne avrebbero tratta gli astronomi. La sco-

verta del pianeta Nettuno, fatta dietro le sole indicazioni date dalla scienza della mutua gravità dei corpi celesti, ha reso profetiche queste parole di Hook.

Da tutto ciò si rileva quale progresso avesse fatto l'idea di una gravitazione universale, allorchè nel 1684, tredici anni dopo la pubblicazione del saggio di Hook, appariva per la prima volta l'immortale opera di Newton: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica.* E quantunque Pimberton, biografo di Newton, assicurasse che questo grand'uomo aveva scoverta la legge della gravitazione fin dal 1666, purtuttavia ritenendo la priorità del lavoro di Hook, vedremo che quest'opera non ha potuto far altro che dare un' occasione all' immenso problema risoluto nel libro dei Principii.

Leggi di Kepler.

56. Gli astronomi antichi, partendo dall'idea della semplicità e perfezione della Natura quale essi l'avevano concepita, stabilirono senza verun dato di osservazione che il moto dei pianeti fosse circolare ed uniforme. Copernico seguì questo falso concetto; e perciò avvenne che mentre il suo sistema rappresentava il vero ordinamento planetario, purtuttavia quanto ai particolari delle osservazioni astronomiche si trovava meno soddisfacente degli epicicli tolemaici. Per questa maggior divergenza dal fatto Ticho-Brahé, il più grande osservatore di quel tempo, rigettò il nuovo sistema, e si fece ad immaginarne un altro che fosse in miglior accordo colle osservazioni celesti. E Kepler, discepolo di Brahé, si affaticò in vano per molti anni a poter conciliare colle osservazioni del suo maestro il sistema copernicano di cui era zelante promotore.

E facendo all'uopo diligenti osservazioni sul pianeta Marte, egli conobbe che il moto del pianeta non era nè uniforme nè circolare; ma che si sarebbe ottenuto un pieno accordo coll'idea copernicana, ove si fosse supposto che la traiettoria sia un ellisse avente uno dei fuochi nel centro del sole, e che il moto sia tale da far descrivere al raggio vettore del pianeta aje proporzionali ai tempi. Risultati egualmente felici egli ebbe, applicando la stessa ipotesi ai rimanenti pianeti; e così si ebbero le due seguenti leggi, che reggono ancora i moti dei satelliti intorno ai pianeti primarii.

1ª. *I pianeti girano intorno al sole, descrivendo coi loro raggi vettori aje proporzionali ai tempi.*

2ª. *Le orbite planetarie sono ellissi che hanno un fuoco comune nel centro del sole, come quelle dei satelliti lo hanno nel centro del loro pianeta primario.*

Il fatto di una maggior durata dei moti periodici dei pianeti, a misura che crescono le loro distanze dal sole, aveva fatto presentire che tra le une e le altre dovesse esistere una qualche relazione. Kepler, che vagheggiava l'armonia pitagorica delle sfere celesti, si fece a ricercarla comparando le durate e le distanze ora ai poliedri della Geometria, ora agli intervalli dei suoni musicali; ed in queste fantastiche ricerche aveva già speso 17 anni, quando un'ispirazione felice lo condusse a comparare i quadrati dei tempi periodici dei pianeti ai cubi delle loro medie distanze dal sole. La proporzione riuscì esatta, e si ebbe così la seguente legge:

3ª. *I quadrati dei tempi periodici dei pianeti sono come i cubi dei semi-assi maggiori delle loro orbite, ossia delle loro medie distanze dal sole.*

57. Colla scoverta delle tre leggi di Kepler ebbe origine la vera astronomia geometrica, vale a dire la possibilità di calcolare il luogo di un pianeta nello spazio in un istante qualunque del tempo. Ma lo spirito umano non poteva appagarsi di questa cognizione puramente fenomenale. La Meccanica razionale, che s'iniziava colla scoverta della legge d'inerzia e della forza centrifuga per opera di Descartes, e che riceveva da Galilei le leggi del moto uniformemente accelerato, già cominciava a riguardare il moto nella sua dipendenza dalle cagioni produttrici. Se Tolomeo nell'immaginare gli epicicli planetarii, avesse potuto considerare ciò che dinamicamente bisognava per attuare quei moti così complessi, ne avrebbe rigettata l'idea appena surta nel suo pensiero. Ma allora di ciò non era quistione: la scuola aristotelica insegnava che il moto circolare era naturale ai corpi, e perciò gli epicicli si potevano moltiplicare a piacere degli astronomi. Il primo fisico il quale abbia compreso che i moti celesti debbono esser sottoposti alle

Primo concetto di una Meccanica celeste.

medesime leggi di quelli che si producono sulla superficie della terra, fu Descartes; che all'uopo concepiva l'idea più ardita, che potesse mai crearsi dall'intelletto umano, quella dei vortici. E la posterità gli è stata sconoscente, facendo di questo grandioso benchè fantastico concetto, il simbolo di ogni eccentrico pensiero; senza por mente che bisognava il romanzo di Descartes, perchè Hook avesse intraveduta qualche cosa di quella mirabile storia del cielo, che fu poi divinata da Newton.

Ma prima di esporre il grande trovato newtoniano, gioverà dire che cosa sia *sistema*, e per quali caratteri si diversifichi dalla *teoria*.

Sistema e teoria.

58. Il *sistema*, che etimologicamente vuol dire *costruzione*, è un principio essenzialmente sintetico. La sua genesi sta in un concetto dello spirito, anteriore al fatto, o che da questo non toglie tutto al più che una semplice occasione; quindi la sua realtà, lungi dal presentarsi al pensiero come una necessità logica, si offre in vece come un problema da risolversi. I fisici, prima che avessero avuti strumenti atti alla giusta misura di un angolo, stabilirono il principio che la luce nella riverberazione speculare facesse l' angolo di riflessione eguale a quello d'incidenza; e ad un esperimento che difficilmente può guarentire l' esattezza di una misura angolare tra i limiti di un grado, Descartes appoggiava la legge della rifrazione della luce. Questi principii, che la Fisica rigetterebbe, se potesse dubitare del loro rigore geometrico, sono di loro natura sistematici; e la loro realtà ha bisogno di una dimostrazione, che a suo luogo faremo conoscere.

Al contrario la *teoria*, che vuol dir *veduta*, è essenzialmente analitica. Lo spirito ne forma l'idea, *vedendo* in una quantità di fenomeni il solo fatto che sia ad essi comune: *ogni corpo è grave, ogni corpo è poroso, ogni corpo è dilatabile dall'azione del calore*, ecc. sono principii teoretici, perchè ottenuti per induzione. La loro genesi ne guarentisce la realtà; e se lo spirito può dubitarne, ciò potrà essere della sola estensione dell'idea, giammai della comprensione. Che l'argilla, a modo di

esempio, messa al fuoco si restringa in vece di dilatarsi, ciò nulla toglie alla realtà del concetto che ci fa riguardare i corpi come dilatabili per l'azione del calore; ma soltanto ci avverte che nell'espressione: *tutti i corpi sono dilatabili per l'azione del calore*, la parola *tutti* non vuol esser presa in un senso rigorosamente assoluto.

59. Considerando le leggi di Kepler, non vi si scorge alcuna vicendevole dipendenza. Ponendo, a modo di esempio, la proporzionalità delle aje ai tempi, non si vede perchè le curve planetarie debbano essere ellittiche, e perchè i quadrati dei tempi periodici debbano seguire la ragione dei cubi delle medie distanze dal sole. Per coordinare queste leggi ad un principio da cui derivassero, come corollarii da un teorema, Newton suppose che tutte le parti della materia si gravitino a vicenda con forza proporzionale direttamente alle masse ed inversamente ai quadrati delle distanze. Così la forza che spinge un grave a cadere verso la terra, non è che la risultante di tutte le mutue attrazioni che han luogo tra le molecole del grave e quelle del nostro pianeta. Nello stesso modo è da riguardarsi la gravitazione della luna verso la terra, e quella di tutti i pianeti tra loro e verso il sole. Sistema newtoniano.

Ma qui si presenta una gravissima difficoltà. Se le mutue tendenze dei corpi celesti sono risultanti delle reciproche attrazioni delle loro molecole, sarà d'uopo determinare i valori, le direzioni ed i punti di applicazione di queste risultanti, prima di far servire l'ipotetico concetto di una mutua gravità a chiarire la ragione delle leggi kleperiane. Or determinare la risultante di componenti infinite di numero, e con direzioni continuamente varie, egli è un problema da spaventare chi della Statica non conosce oltre gli elementi; e la scienza delle forze al tempo di Newton non si estendeva oltre le leggi di equilibrio delle macchine semplici e la conoscenza empirica della composizione dei moti. Facendosi alla soluzione dell'arduo problema, Newton ebbe a cominciare dal crear l'algoritmo che doveva esser l'istrumento della soluzione; ed all'uopo formolò il celebre *principio dei limiti*, mercè il quale ha potuto dimostra-

re i due seguenti teoremi, in cui ebbe i principii fondamentali per calcolare le mutue gravitazioni dei corpi celesti.

I.

Se ai singoli punti di una superficie sferica tendano eguali forze centripete, decrescenti nella ragione dei quadrati delle distanze da essi punti, un atomo ovunque situato nell'interno della superficie sferica, resterà in equilibrio.

II.

Date le stesse cose, un atomo situato fuori della superficie sferica sarà attratto verso il centro di essa con forza reciprocamente proporzionale al quadrato della distanza dell' atomo dallo stesso centro.

Dal secondo di questi teoremi deriva:

— 1° Che potendosi riguardare un corpo sferico omogeneo come composto d'infiniti strati sferici concentrici di doppiezza infinitesima; e l'azione di ogni strato sopra una molecola esterna essendo inversamente proporzionale al quadrato della distanza della molecola dal centro; nella stessa ragione starà la somma delle azioni degl'infiniti strati componenti la sfera, ossia l'azione dell' intero solido — È chiaro che la stessa ragione dovrà ancora aver luogo per un solido sferico composto di strati, la cui densità, quantunque varia da uno strato all'altro, sia però uniforme in ciascuno di essi.

— 2° Che supponendo due sfere omogenee, o almeno composte di strati sferici omogenei, le cui molecole si attraggano con forze reciprocamente proporzionali ai quadrati delle loro distanze, le due sfere si attrarranno a vicenda con forze inversamente proporzionali ai quadrati delle distanze dei loro centri. Imperocchè all'azione di una sfera sopra una molecola dell'altra potendosi sostituire una forza proporzionale alla massa della sfera e riunita nel suo centro, ed altrettanto potendosi fare dell'azione della seconda sfera sopra una molecola della

prima; ne segue che le due attrazioni risultanti si troveranno proporzionali alle masse delle due sfere e saranno applicate ai loro centri.

60. Mercè il precedente teorema sull'attrazione delle sfere, pel quale le mutue attrazioni dei pianeti si possono riguardare come forze applicate ai loro centri, questo ipotetico concetto ha potuto servire a render ragione delle leggi kepleriane senza incontrare la grave difficoltà statica accennata nel n.° 59. Ragione delle leggi kleperiane.

E cominciando dalla 1ª delle leggi kleperiane, ossia dalla proporzionalità delle aje ai tempi, Newton ne dimostrava nel seguente modo la immediata dipendenza dalla gravitazione dei pianeti verso il sole e dei satelliti verso i loro pianeti primarii. Rappresenti S (Fig. 56 *bis*) il centro del sole ed *a* quello di un pianeta ad un certo istante del tempo; sia inoltre *ab* l'arco che descriverà nel successivo elemento di tempo, e che per la sua piccolezza riguarderemo come rettilineo. Quando il pianeta sarà pervenuto in *b*, la legge d'inerzia gli farebbe descrivere in un tempo eguale al primo la retta $be=ab$; ma correrà invece per un secondo archetto *bc* della sua orbita, soddisfacendo alla legge che il suo raggio vettore descriva il triangolo *Sbc* equivalente ad *Sab*. Ma per essere $be=ab$, il triangolo *Sab* è equivalente al triangolo *Sbe*; sarà dunque *Sbe* equivalente ad *Sbc*, e perciò *ce* parallela nel *Sb*. Quindi presa $bf=ce$, il cammino *bc* risulterà da una forza tangenziale diretta secondo *be* e da una tendenza verso il centro S del sole. Laonde i pianeti dovranno necessariamente gravitare verso il centro del sole, se i loro raggi vettori descrivono aje proporzionali ai tempi.

Poniamo viceversa che sia data una tendenza del pianeta verso il centro del sole, e che in conseguenza dopo aver descritto l'archetto *ab*, si trovi sottoposto alla forza tangenziale *be* ed all'attrazione solare *bf*. Per l'azione congiunta di queste due forze percorrerà nel successivo elemento di tempo la diagonale *bc* del parallelogrammo *bfce*, ed il suo raggio vettore *Sb* desciverà il triangolo *Sbc* equivalente ad *Sbe*; ma questo è equivalente al triangolo *Sab* descritto nell'egual tempo precedente; dunque *Sab* è equivalente ad *Sbc*. Quindi se i pianeti

son gravi verso il sole, necessariamente le aje descritte dai loro raggi vettori dovranno essere proporzionali ai tempi.

E qui giova osservare che la legge delle aje risulta dalla sola esistenza di un'attrazione solare senza verun riguardo alla legge a cui questa attrazione potrà essere sottoposta. Non è lo stesso poi delle due altre leggi kepleriane: esse suppongono necessariamente una gravità che varii nella ragione inversa dei quadrati delle distanze.

E quanto all'esposizione di queste due leggi non possiamo far altro che semplicemente enunciarle, imperocchè nè le dimostrazioni sintetiche date da Newton, nè le deduzioni analitiche dei moderni potrebbero divenire abbastanza elementari. Il lettore che abbia le necessarie cognizioni di Calcolo superiore, potrà vedere ciò che ne abbiamo detto nei n' 193 a 199 della nostra MECCANICA RAZIONALE.

I.

Se un corpo muovasi per un'ellisse in virtù di tendenza verso uno dei fuochi, questa tendenza dovrà seguire la ragione inversa dei quadrati delle distanze da esso fuoco.

E reciprocamente: *se un corpo muovasi per azione di celerità impressa e di tendenza verso un punto, inversamente proporzionale ai quadrati delle distanze da esso punto, la curva descritta sarà una sezione conica ; e nella specie sarà un'ellisse, un'iperbola od una parabola, secondo che varieranno nell'origine del moto la velocità del mobile e la sua distanza dal centro attraente.*

II.

Se più corpi si muovano per ellissi aventi un fuoco comune, verso del quale i corpi tendano con forza reciprocamente proporzionale al quadrato della distanza, i quadrati dei loro tempi periodici saranno come i cubi delle loro distanze dal centro attraente: e viceversa.

Mercè questi teoremi Newton ha mostrato come le due ultime leggi di Kepler siano un effetto necessario dell'esistenza di una forza, che inversamente al quadrato della distanza spinga le une verso le altre tutte le molecole dei corpi componenti il sistema planetario.

Ma questa forza esiste realmente? — Se ciò potesse dimostrarsi, il concetto newtoniano non sarebbe che l'idea di un fatto. Or della realtà dei principii ipotetici non possiamo aver altra pruova che la realtà di tutte le loro possibili conseguenze. E queste già sono in gran numero pel sistema di cui è parola; imperocchè oltre all'argomento che Newton ne traeva dall'esistenza della gravità terrestre, ch'egli fu primo a conoscere realmente varia in ragione inversa dei quadrati delle distanze dal centro della terra (n° 54), altri egli ne previde nelle forme e perturbazioni planetarie, nelle orbite delle comete, nelle maree, nella precessione degli equinozii, ecc. ecc. Di questo immenso lavoro Newton ha posto la prima base; i grandi geometri, venuti dopo di lui, lo hanno continuato, e dalle loro indefesse ricerche è risultato il più glorioso monumento della intelligenza umana, la Meccanica celeste.

Alcune conseguenze del sistema newtoniano.

61. Se l'azione terrestre su i gravi, che vi poggiano sopra, è risultante delle mutue attrazioni tra le molecole del globo e quelle dei gravi, questi nella loro discesa dovrebbero seguire la direzione del raggio terrestre menato al punto di partenza, se la terra fosse una sfera omogenea, o almeno composta di strati la cui densità, quantunque varia dall'uno all'altro, fosse non di meno uniforme in ciascuno di essi. Ma la terra non è esattamente sferica, e le cognizioni geologiche non ci permettono riguardarla come omogenea o composta di strati omogenei; in conseguenza se il sistema newtoniano è vero, la direzione della gravità deve alquanto divergere dal raggio terrestre, e la divergenza deve variare secondo i luoghi. Questa conseguenza si è verificata nella misura del grand'arco di meridiano eseguita in Francia nell'occasione di stabilire il sistema metrico decimale. Si è trovato che il luogo delle verticali per un arco dello stesso meridiano era una superficie storta;

ciò che chiaramente indicava la non convergenza delle verticali ad un medesimo punto.

Dallo stesso principio di una mutua gravitazione tra tutte le molecole del nostro pianeta segue che la direzione del filo a piombo debba patire un deviamento nella vicinanza di qualche grande montagna. Newton aveva preveduto questo fatto, e ne aveva dato il metodo di determinazione nella sua opera sul *Sistema del mondo*, quando Bouguer e La Condamine misurando nel 1738 tre gradi del meridiano terrestre presso Quito nel Perù, si avvidero che l'azione del monte Chimborazo faceva deviare il loro filo a piombo di 7",5 dalla verticale. Più tardi, nel 1774, Masckeline coi mezzi somministrati dalla Società Reale di Londra fece analoghe osservazioni al nord ed al sud della catena dei Cheviot nella Scozia, ed ottenne un deviamento di 6".

L'azione delle montagne in deviare il filo a piombo fece concepire a Bouguer la possibilità di risolvere il più arduo problema che fosse mai surto in mente umana, quello cioè di pesare il globo terrestre. Seguendo questa idea Hutton calcolò sui risultamenti ottenuti da Masckeline, e trovò che la densità media della terra è 5 volte maggiore di quella dell'acqua.

Lo stesso problema fu pure risoluto da Cavendish mediante una bilancia di torcimento. La quale si componeva (Fig. 57) d'una leva sospesa orizzontalmente ad un filo metallico, e portante negli estremi due palle di piombo. Lateralmente a queste ed in opposte posizioni stavano verticalmente sospesi due grandi globi dello stesso metallo, in modo da poterli avvicinare alle palle della leva. L'apparecchio stava chiuso in una stanza priva di comunicazione esterna, affinchè l'agitazione dell'aria non prendesse parte nei movimenti che potevano esser prodotti dalla mutua gravitazione delle sfere: eravi però in una delle pareti della stanza un foro chiuso da vetro, per dar adito alla luce che doveva illuminare l'apparecchio, ed a piccola distanza vi penetrava per altro foro un cannocchiale destinato ad osservare con grande precisione i movimenti della leva. Questa si vedeva prendere un moto di oscillazione tosto

che alle sue sfere terminali veniva avvicinato il sistema dei globi. La qual cosa, mentre somministrava una pruova diretta della mutua gravitazione dei corpi, offriva i dati necessarii alla soluzione del problema. A questo modo Cavendish ottenne che la densità della terra sia 5,48 di quella dell'acqua.

I calcoli di Cavendish furono riveduti da Hutton, che n'ebbe 5,32. Con una bilancia meglio ordinata Reich in Germania ottenne nel 1837 il numero 5,44. Nel 1843 Baily per incarico della Reale Società Astronomica di Londra ebbe col metodo di Cavendish il numero 5,66. E conosciuto questo risultamento Reich si fece a ripetere i suoi sperimenti, avendone il numero 5,58. La media aritmetica 5,54 di queste diverse determinazioni si potrà ritenere come valore della densità media della terra. Ed a sostegno del sistema newtoniano giova osservare che per la densità media della terra si sono ottenuti numeri poco differenti coi due metodi affatto diversi di Maskeline e di Cavendish.

LIBRO TERZO.

DELLE FORZE MOLECOLARI.

CAPO PRIMO.

DEFINIZIONE E DIVERSE SPECIE DI FORZE MOLECOLARI.

Definizione. 62. Si dicono *forze molecolari* quelle il cui raggio di azione è infinitesimo; ed ora vedremo che realmente esistono forze di questa specie.

Coesione. 63. La resistenza più o meno grande che i solidi oppongono alla loro meccanica divisione, dimostra che una speciale forza attrattiva esiste tra le loro molecole. A questa forza si è dato il nome di *coesione*.

Se dopo aver diviso in due parti un solido qualunque, noi rimettiamo a contatto le facce separate, vedremo ch'esse più non aderiscono. Or questa mancanza di adesione potrà essere avvenuta, o perchè l'azione meccanica ha realmente distrutta la forza che riuniva le due parti del solido, o perchè la rispettiva loro posizione non essendo stata esattamente riprodotta, la forza che prima era assai grande, è poi divenuta presso che nulla. Di queste due ipotesi la seconda soltanto è ammissibile, stante il fatto che se il corpo spezzato è capace di pulimento, le facce di separazione torneranno ad unirsi con forza, quando siano state a sufficienza spianate. In un'esperienza fatta da Muschenbroeck due cilindri di vetro di 2 pollici di diametro, riscaldati alla temperatura dell'acqua bollente, restarono aderenti per le loro basi, unte di un poco sego, con forza equivalente a 130 libbre; e colle medesime circostanze l'adesione

fu di 170 libbre per due cilindri di piombo e di 300 libbre per due cilindri di ferro. Martin riferisce nella sua *Filosofia Britannica*, che avendo preso due palle di piombo pesanti circa una libbra, ed avendovi fatta con un temperino una sezione piana di presso a $\frac{1}{8}$ di pollice quadrato, esse restarono così aderenti dietro una forte pressione che un peso di 150 libbre non fu valevole a separarle. In un'altra esperienza egli pose a contatto due dischi di rame del diametro di pollici 4 $\frac{1}{2}$, interponendovi un pò di sego, e non potè rinvenire due uomini abbastanza robusti per poterli separare — La coesione, che talvolta prende la forma di adesione, è dunque una forza molecolare nel senso della definizione data nel n° precedente.

La coesione non è propria dei solidi; avvene una certa dose anche nei liquidi. La tromba a corda, inventata nel 1770 da un tal Vera portalettere parigino, ha data una pruova sorprendente dell' esistenza di questa forza nell' acqua. La macchina del Vera consisteva in una fune continua che passava per le gole di due carrucole, l'una mobile restava immersa nell'acqua del pozzo; l'altra era fissa al luogo a cui l'acqua si voleva innalzare. All'asse di questa seconda carrucola era fermato un rocchetto a cui si dava moto per mezzo di una ruota dentata. Così la fune uscendo celeramente dall' acqua del pozzo, ne traeva seco una falda che poi deponeva in apposito recipiente, ivi costretta a lasciarla per l'angustia di un foro per cui doveva passare. Con una macchina simile, messa in moto da due uomini, si ebbero 250 pinte di acqua elevate a 64 piedi in 8 minuti; in un altro esperimento si ebbero in 2 minuti 15 pinte elevate a 168 piedi.

Ma la coesione nei liquidi, non che la loro adesione ai solidi, può essere direttamente valutata. Al braccio di una bilancia, il cui giogo possa salire e scendere a piacere dell' osservatore, sospendasi orizzontalmente un disco di vetro del diametro di circa un decimetro; stabilito l'equilibrio della bilancia, si faccia scendere il giogo finchè il disco tocchi una sottoposta massa di acqua. Facendosi allora ad elevare alquanto il giogo, si vedrà il disco rimaner aderente all'acqua, donde

verrà poi separato per mezzo di nuova carica sull'altra coppa. E questa carica non misura l'adesione del vetro all'acqua, ma in vece la coesione che univa la prima falda liquida alla seconda, giacchè guardando la faccia inferiore del disco, la si vedrà coverta d'un velo di acqua. Quindi si comprende come avvenga che sperimentando con dischi diversi, ma tutti capaci di esser bagnati dall'acqua, si trova che la carica necessaria a staccarli dal liquido è indipendente dalla natura del disco. Al contrario, sperimentando con dischi diversi e con un liquido che non li bagni, le cariche che debbono vincere l' adesione del solido al liquido, si troveranno varie come le sostanze dei dischi.

Affinità chimica.

64. Se la coesione e l'adesione possono essere superate da forze meccaniche, non è lo stesso della così detta *affinità chimica*. Colla triturazione, a modo di esempio, potremo dividere un pezzo di marmo in parti così piccole da essere presso che impalpabili. Purtuttavia ognuno di quei granellini consta di diversi elementi che l'azione meccanica non saprebbe giammai separare. Coi metodi che la Chimica insegna, il marmo è decomponibile da prima in una sostanza gassosa, l' *acido carbonico*, ed in una terra bianca, la *calce*: questa poi si compone di *calcio* ed *ossigeno*, e l'altro di *ossigeno* e *carbonio*. Ogni minimo granellino di marmo è dunque composto di carbonio, ossigeno e calcio. E la forza che unisce questi elementi non è comparabile che ad un'altra della stessa sua natura; così se l' azione meccanica è impotente a separare nel marmo l'acido carbonico dalla calce, ciò si otterrà facilmente versandovi sopra dell'acido solforico. Il contatto di questo liquido vi produrrà un'effervescenza, colla quale l'acido carbonico svolgendosi cede il suo posto all'acido solforico; e per questa prevalenza di attrazione con cui un corpo separa un elemento dalla combinazione in cui si trova, la forza, di cui parliamo, ha ricevuto il nome *di affinità chimica*.

Ripulsione termica.

65. I corpi si dilatano col divenire più caldi, e si ristringono raffreddandosi. Ciò prova che il calore genera nelle molecole dei corpi una forza ripulsiva, la quale a misura che dimi-

nuisce o cresce, fa risultare più o meno intensi gli effetti dell'opposta attrazione molecolare; quindi è che i corpi scemano di volume nel primo caso, e ne aumentano nel secondo.

La ripulsazione termica (da *therme* calore) decresce, in ragione della distanza, più rapidamente dell' opposta attrazione molecolare, poichè ove si ponesse che le due forze decrescano egualmente, allora la dilatazione, una volta cominciata, non potrebbe aver limite che nella dispersione delle molecole nello spazio. La qual cosa è contraddetta dall'esperienza, che ci fa conoscere esser la dilatazione una quantità definita dalla natura del corpo e dal grado di calore.

CAPO SECONDO.

DIVERSE FORME DELLA FORZA DI COESIONE.

Classificazione dei solidi rispetto al loro modo di coesione.

66. La pressione, la percossa, la trattura, la flessione, l'azione di una punta che s' incunea tra le molecole di' un corpo, ecc. sono altrettanti mezzi meccanici atti a vincere la coesione nei solidi. Or se il corpo che cede più facilmente di un altro alla percossa, nella stessa ragione cedesse alla pressione, flessione, ecc. basterebbe sperimentare un solo di questi mezzi, per dedurne le ragioni di tutti gli altri. Ma la cosa va diversamente: il vetro, a modo di esempio, che cede così facilmente alla percossa, non si lascia intaccare dalla punta di un temperino.

Questa diversa resistenza dei solidi ai varii mezzi adoperati per vincere la loro coesione, li ha fatti distinguere in più classi. Così si hanno corpi *duri* o *teneri*; *molli* od *elastici*; *tenaci* o *fragili*; *rigidi* o *flessibili*; *duttili*, *malleabili* od *acri*.

È *duro* il corpo che resiste all'azione di una punta, è *tenero* viceversa se cede facilmente — Se cede a modica pressione senza che mostri tendenza di tornare alla prima forma, il corpo si dirà *molle*, e sarà invece *elastico* se cessata la pressione ritorna alla figura che aveva — Il corpo che resiste alla percossa od alla trattura, è *tenace*; ed è poi *fragile* nel caso opposto — È *rigido* il corpo che resiste alla flessione, e se così non fosse si direbbe *flessibile* — I corpi che si lasciano facilmente ridurre in fili, sono *duttili*, e *malleabili* se in lamine; ma se resistessero a queste azioni meccaniche, sarebbero *acri*.

Queste diverse proprietà dei solidi possono esser modificate per azione meccanica o per cangiamento di temperatura. I metalli diventano acri sotto l'azione prolungata del martello e della filiera; e perchè ritornino duttili e malleabili, fa d'uopo *ricuocerli*, vale a dire riscaldarli ad alta temperatura, e poi

lasciarli raffreddare colla massima lentezza. Ed in generale l'accrescimento di temperatura rende più spiccate quelle proprietà dei solidi che dipendono da debole coesione ; quindi è che i metalli sono più duttili a caldo che a freddo , ed il vetro, che all'ordinaria temperatura è tenace ed acre , si lascia filare come la seta quando ha un certo grado di calore.

Il raffreddamento produce effetti opposti , e n'è pruova il fatto della *tempera*. È noto che i corpi atti a ricevere questa modificazione, l'acquistano per immersione in un bagno freddo dopo essere stati fortemente riscaldati. In questo modo si tempera l'acciaio , e n'esce duro ed elastico; e come più alta è stata la sua temperatura nell'atto dell'immersione , maggior durezza ne acquista, dimodochè si può aver dell'acciaio sì fortemente temperato da esser fragile come il vetro.

Le modificazioni che la tempera apporta nell'equilibrio molecolare di un solido, sono chiaramente indicate nei fenomeni delle *lagrime batave* , che si ottengono facendo cadere delle gocce di vetro fuso in un bagno di acqua fredda. Spezzando il filo *cd* (Fig. 58) della lagrima , nel corpo *ce* si produce uno scoppio che lo riduce in polvere; e la cagione n'è la seguente. È noto che il vetro mal conduce il calore, e perciò la falda esterna della lagrima ha potuto solidificarsi e definirne il volume, mentre la massa interna era tuttavia dilatata per la sua alta temperatura; e quando pel successivo raffreddamento essa avrebbe dovuto contrarsi, è stata a ciò impedita dall'attrazione della falda esterna. Così si è generata una forte tensione molecolare , che ha disgregata violentemente la massa nell'istante in cui è mancata la forza che l'equilibrava. Tutta la ragione del fatto sta dunque nell'imperfetta conduzione termica del vetro ; quindi è che nulla di simile si può osservare nell' acciaio temperato , che come buon conduttore del calorico non ha presentato due tempi a sufficienza distinti tra il raffreddamento della falda esterna e quello della massa interiore.

Se la rapida sottrazione di calore tempera l'acciaio , il vetro , ecc. , basterà riscaldare di nuovo questi corpi e poi lasciarli lentamente raffreddare, perchè ne siano stemperati in

tutto o in parte, secondo che il nuovo grado di calore sarà stato eguale o minore del primo.

Vi sono però dei corpi che acquistano o perdono la loro tempera con un procedimento del tutto opposto: così la lega di 4 parti di rame ed 1 di stagno, di cui si fanno gli strumenti musicali cinesi, denominati *tam-tam*, diviene fragile come il vetro quando si lascia raffreddare lentamente, e riesce malleabile da una rapida sottrazione di calore.

Proprietà meccaniche dei corpi elastici.

67. Un corpo elastico rappresenta un equilibrio molecolare stabile, essendochè le sue molecole tornano alle prime posizioni, tosto ch'è cessata l'azione perturbatrice; al contrario un corpo molle non è che un equilibrio molecolare indifferente.

Il ritorno delle molecole di un corpo elastico alle loro prime posizioni essendo prodotto dall'azione di una forza continua, dovrà esser seguito da una serie di oscillazioni analoghe a quelle di un pendolo allontanato dalla verticale di equilibrio. Queste escursioni molecolari, in cui a suo luogo vedremo consistere l'azione produttrice del suono, sono quelle che danno origine al rimbalzo dei corpi elastici. Esaminando il luogo in cui una palla di avorio ha urtato un piano di marmo leggermente unto di olio, ivi si scorgerà una macchia circolare oscura, indizio della depressione patita dalla palla; la quale così ha potuto tor via l'olio da una certa estensione del piano, anzichè dal solo punto del suo contatto geometrico. Or alla forma depressa *ab* (Fig. 59) succedendo la forma allungata *cd*, la palla sarà spinta in direzione opposta al moto che l'ha depressa. E poichè questo moto non può essere che normale alla superficie urtata, ne segue che se la palla sia andata ad incontrar perpendicolarmente la superficie, per la stessa via verrà rimbalzata; e se il moto sia stato obbliquo, allora prendendo sulla stessa sua direzione la parte *mc* (Fig. 63) per dinotare la velocità d'incidenza, questa si decomporrà nella velocità normale *kc* e nella tangenziale *gc*. Ponendo che la reazione elastica riproduca esattamente la prima in *ck*, la palla dopo l'urto sarà animata dalle velocità *ck* e $ct = cg$, e quindi avrà la velocità risultante *cn*, che farà colla normale *ck* al punto d'inci-

denza l' *angolo di riflessione kcn* eguale all'*angolo d' incidenza mck*. Ma se della componente normale *kc* della velocità incidente la reazione elastica non ne riproduce che una parte, come *ch*, allora la velocità dopo l'urto sarà *cs*, la quale farà un angolo di riflessione più grande di quello d'incidenza.

Per sapere dunque se questi due angoli riescano o pur no eguali, basterà conoscere se la reazione elastica dia o pur no una velocità eguale alla componente normale della velocità incidente. Or è noto (n°39, — 3°) che in ogni punto della discesa di un grave si ha tale velocità che se fosse comunicata in senso contrario farebbe salire il grave all'altezza donde è caduto. Supponendo dunque che la reazione elastica pareggi la componente normale della velocità incidente, una palla d'avorio lasciata cadere sopra un piano orizzontale, dovrebbe risalire all'altezza della caduta, meno la piccola differenza dovuta all'ostacolo dell'aria. Il fatto prova in vece ch'esiste una grande differenza tra l'altezza della caduta e quella del rimbalzo; e che analoghi effetti si ottengono con palle elastiche di altra natura. Non si conosce dunque alcun solido *perfettamente elastico*; e perciò l'eguaglianza tra l'angolo di riflessione e quello d'incidenza deve riguardarsi come un limite, a cui il fatto tanto meglio si avvicina quanto meno imperfetta è l'elasticità del mobile.

Facciamoci ancora a determinare nella loro espressione limite le velocità che avranno dopo l'urto due palle elastiche A e B (Fig. 60), di cui siano m ed m' le masse, v e v' le velocità prima dell'urto. Poniamo $v>v'$, e che le due palle si muovano coi loro centri di gravità sopra una stessa retta e nel medesimo senso. Quindi A dovrà raggiungere B, e premendola colla forza $m(v-v')$, le due palle a vicenda si comprimeranno finchè non avranno acquistata una velocità comune. In questo stato, che immaginiamo rappresentato dalla Fig. 60 *bis*, la loro velocità comune sarà espressa (n° 13) da:

$$w = \frac{mv + m'v'}{m + m'},$$

la palla A avendo perduta la velocità $v-w$, e B avendo acquistata la velocità $w-v'$. Ma alla compressione prodotta dall'urto succedendo per reazione elastica l'allungamento indicato nella Fig. 60 *ter*, la palla A farà un'altra perdita $v-w$, e B un altro acquisto $w-v'$; dimodochè chiamando u ed u' le velocità di A e B dopo l'urto, sarà:

$$u=v-2(v-w)=2w-v=\frac{mv+m'(2v'-v)}{m+m'},$$

$$u'=v'+2(w-v')=2w-v'=\frac{m'v'+m(2v-v')}{m+m'}.$$

Su queste formole facciamo le seguenti ipotesi:

— 1ª. Che B sia in riposo, e quindi $v'=0$. In questo caso si ha:

$$u=\frac{v(m-m')}{m+m'}, \quad u'=\frac{2mv}{m+m'}.$$

In conseguenza la palla A continuerà a muoversi per la stessa linea, si arresterà del tutto, ovvero tornerà indietro, secondochè sarà $m>m'$, $m=m'$, o $m<m'$.

Ponendo nelle ultime formole $m'=\infty$, esse diverranno applicabili al caso in cui B rappresenta un ostacolo invincibile. In questa ipotesi dividendo per m' i termini delle due espressioni frazionarie, si avrà:

$$u=\frac{v\left(\frac{m}{m'}-1\right)}{\frac{m}{m'}+1}=-v, \quad u'=\frac{2\frac{m}{m'}v}{\frac{m}{m'}+1}=0.$$

Quindi la palla A rimbalzerà colla velocità stessa che aveva prima dell'urto.

— 2ª. Che le due palle abbiano velocità opposte. Allora ritenendo come positiva la velocità v, si muterà il segno a v'; e le velocità dopo l'urto saranno:

$$u = \frac{mv - m'(2v' + v)}{m + m'}$$

$$u' = \frac{-m'v' + m(2v + v')}{m + m'}.$$

Quindi se pongasi $m = m'$, sarà:

$$u = \frac{-2mv'}{2m} = -v' \quad , \quad u' = \frac{2mv}{2m} = v \;;$$

vale a dire che le due palle torneranno indietro scambiando a vicenda le loro velocità.

68. I fili e le verghe, sottoposti all'azione di una forza traente nel senso della loro lunghezza, mostrano tra certi limiti una elasticità perfetta, vale a dire che ritornano esattamente alla prima lunghezza, quando cessa l'azione perturbatrice del loro equilibrio molecolare. E tra i limiti di perfetta elasticità l'allungamento si è trovato proporzionale alla forza traente; dimodochè conoscendo il peso e da cui dovrà esser tratto un filo lungo 1 metro e di 1 millimetro quadrato di sezione, perchè si allunghi di 1 millimetro; si potrà per mezzo della formola: Elasticità per tiramento.

$$d = \frac{k}{e} \cdot \frac{l}{s}$$

determinare in millimetri l'allungamento d che un peso k produrrà in un filo o verga della stessa natura, lunga l metri e di s millimetri quadrati di sezione. Il numero e, vario secondo la natura del filo, si denomina *coefficiente di elasticità*.

Un apparecchio comodo per questo genere di sperienze è rappresentato dalla Fig. 61. Gli allungamenti del filo vi sono misurati per mezzo di un *catetometro*.[1]

[1] Il catetometro, ossia *misuratore delle altezze*, consiste in un cannocchiale orizzontale, scorrevole lungo una riga verticale divisa in millimetri, le cui frazioni son date da un nonio. Dirigendo successivamente l'asse del cannocchiale su due punti situati sopra una stessa verticale, il cammino fatto sulla riga graduata darà la lunghezza della congiungente i due punti osservati.

Valori di e in Kilog.		Osservatori
Ferro	20,	Duleau
	23.	Tredgold
	21,193.	Savart
Ferro fuso	9,029.	Rondelet
	12,	Tredgold
	11,530.	Id.
Acciaio	18,134.	Savart.
Rame	13,147.	Id.
	10,767.	Id.
	12,494.	Id.
Ottone	9,815.	Id.
Vetro	5,847.	Id.
	5,993.	Id.
	5,234.	Id.
Legno di quercia	1,012.	Duhamel
	1,688.	Dupin
	1,300.	Rondelet
	1,510.	Barlow
	0,683.	Id.
Legno di abete	1,029.	Dupin
	1,300.	Rondelet
	0,934.	Barlow.

Intorno all'uso di questi numeri è da osservarsi: — 1°. Che le sperienze di Duleau dimostrano l'elasticità per un medesimo solido aver uno stesso valore numerico, sia traente o premente la forza a cui è sottoposto: così se un filo di ferro lungo 1 metro e di 1 millimetro quadrato di sezione richiede un peso di 20 kilogrammi per allungarsi di 1 millimetro, dovrà viceversa esser premuto nel senso della sua lunghezza da un egual peso per accorciarsi della stessa quantità. — 2°. Che per quanto un corpo possa sembrare fisicamente omogeneo in tutta la sua estensione, non potremo dedurne che l'elasticità e quindi la forza di aggregazione sia per tutto la stessa; poichè Savart ha osservato che segnati di decimetro in decimetro dei punti di ritrovo sulla lunghezza di alcune

verghe, queste non si allungarono della stessa quantità nelle parti di eguali lunghezze.

— 3°. Che dalle sperienze di W. Weber risulta che l'allungamento definitivo di un filo elastico, sottoposto ad una data forza traente, si compone di due parti; l'una immediata, l'altra che si produce successivamente e che cominciando con celerità va poi mano mano rallentandosi fino a toccare il suo limite. Analoghi fenomeni avvengono nella contrazione che succede all'allungamento, quando il filo è sgravato del peso addizionale.

Quando la lunghezza del filo si accresce per tiramento, il suo volume non rimane inalterato. Poisson, partendo dal fatto che le forze molecolari divengono nulle ad una distanza finita dal contatto, ha trovato che quando un corpo elastico si allunga per forza traente di una quantità α, il suo volume deve accrescersi nella ragione di $1+\frac{1}{2}\alpha:1$. Presso che nel tempo stesso Cagniard-Latour otteneva un fatto conforme al risultamento analitico del Poisson. Egli immerse un filo di ottone in un tubo di vetro pieno di acqua, ed osservò che facendone emergere una lunghezza di 6 millimetri, il livello dell'acqua nel tubo si abbassava di 5 millimetri. Indi egli fermò un capo del filo al fondo del tubo, e traendolo forte per l'altro capo fino a farne uscire dall' acqua 6 millimetri di filo, vide che l'acqua nel tubo non si abbassava che di 2 millimetri e mezzo.

69. Vi è ancora reazione elastica nel torcimento dei fili e delle verghe. A tale obbietto sospendasi il filo verticalmente, e si carichi nell'estremo inferiore di un peso cilindrico che confonda il suo asse con quello del filo: aggiungasi in forma di raggio della base inferiore del cilindro un indice leggiero, mobile sulla circonferenza di un cerchio graduato; e dopo averlo allontanato per un certo arco dal suo luogo di equilibrio, si abbandoni a se stesso. Si produrranno allora delle oscillazioni, tutte di egual durata, benchè continuamente decrescenti di ampiezza fino a ridurre l'indice ed il filo alla primitiva quiete. Il fatto delle oscillazioni pruova la reazione elastica del fi-

Elasticità per torcimento.

lo alla forza che lo torce, ed il loro isocronismo dimostra (n° 44) che la reazione è proporzionale all' angolo di torcimento. A suo luogo vedremo quale partito Coulomb abbia tratto da questa proporzionalità per determinare la legge delle forze elettriche e magnetiche in funzione della distanza.

CAPO TERZO.

STORIA DEL TERMOMETRO.

70. Abbiamo veduto (nº 65) che la ripulsione termica è da annoverarsi tra le forze molecolari. A volerne studiare gli effetti gioverà premettere un'esposizione sommaria degli strumenti inventati per misurare il calore, e perciò detti *termometri*, dalle due voci greche *therme* (calore) e *metron* (misura). Termometro di Galilei.

Il primo termometro di cui si abbia documento storico, fu quello costruito da Galilei nel 1597. Egli prese un cannello di vetro, aperto in un estremo e terminato nell'altro da una pallina: v'introdusse un poco di acqua, e poi capovolto il tubo ne immerse l'estremità aperta in piccolo recipiente dello stesso liquido. Così l'acqua entrata nella pallina, avendone cacciato altrettanto di aria, fece che quando il tubo fu capovolto ed immerso coll'estremità libera nella vaschetta, l'aria interna riuscisse più rara dell'esterna, e quindi l'acqua rimanesse più alta dentro che fuori. Da ciò risultava che accrescendosi il calore atmosferico, l'aria interna all'apparecchio si dilatava e spingeva in basso la colonna liquida restata sospesa nel tubo; e viceversa questa colonna vieppiù saliva, allorchè scemando il calore l'aria interna si contraeva. L'apparecchio costruito da Galilei non era dunque che un termometro ad aria, le cui indicazioni erano date dalla diversa altezza della colonna d'acqua sospesa nel tubo.

71. Quando Galilei costruiva il primo termometro, s'ignorava che la colonna liquida sospesa nel cannello dell'istrumento, vi era mantenuta dalla pressione dell'aria esterna; si pensava invece che fosse ivi entrata perchè non avvenisse vacuo, che la scuola aristotelica aveva detto essere di orrore alla Natura. Quindi l'inventore del nuovo apparecchio non potè prevedere che il movimento della colonna liquida nell'interno Termometro degli Accademici del Cimento.

del cannello, come effetto complesso di pressione esterna ed azione termica, sarebbesi talvolta attuato in senso opposto ai veri cangiamenti di temperatura. Ma quando per la scoverta della pressione atmosferica, fatta dal Torricelli nel 1643, si conobbe la vera cagione che teneva sospesa l'acqua nel cannello del termometro, gli Accademici del Cimento si affrettarono ad eliminarne l'influenza. Essi riempirono di acqua la pallina e porzione del tubo, e poi chiusero ermeticamente. Così si ebbe il primo termometro ad acqua, che gli stessi Accademici poi mutarono in termometro a spirito di vino, quando videro che il freddo invernale congelando l'acqua faceva crepare la pallina dell'istrumento.

Scale termometriche.

72. Se la maggiore o minor quantità di calore del mezzo ambiente il termometro dev'esser indicata dalla diversa altezza a cui ascende la colonna liquida dentro il cannello dell'istrumento, sarà d'uopo provvederlo di una scala che segni sulla lunghezza del cannello delle parti di eguale capacità. Ma questa scala non può essere arbitraria; poichè se così fosse, le indicazioni date da diversi termometri in luoghi o tempi differenti non sarebbero comparabili tra loro: non potremmo, a modo di esempio, dire che il calore in un luogo sia stato più forte che in un altro, sapendo che nel primo luogo un termometro ha segnato 20, mentre nel secondo luogo un altro termometro segnava 10.

A toglier di mezzo questa incertezza non vi sono che due spedienti; uno è quello di segnare sul cannello del termometro i punti a cui siasi elevata la colonna liquida per due valori termici che si possano facilmente riprodurre e che siano sempre ed ovunque gli stessi; l'altro poi consiste nel fissare l'origine della scala in un valore termico costante e stabilire per tutti i termometri una stessa ragione tra la capacità della pallina ed una delle divisioni del tubo.

Il primo di questi mezzi fu proposto da Carlo Renaldini nel 1693, assegnando come limiti invariabili il ghiaccio in fusione e l'acqua bollente. Questi limiti furono poi adottati da Newton nel 1701 per la costruzione del suo termometro ad

olio di lino, che divise in 34 parti eguali o *gradi*; e dallo svedese Celsus, che nel 1745 costruì il primo termometro centigrado a mercurio. E di questo liquido, come corpo termometrico, aveva già fatto uso Fahrenheit nel 1709, prendendo per punti fissi l'acqua bollente ed il freddo più intenso osservato in quello anno a Danzica; e dividendone l'intervallo in 212 gradi.

Del secondo poi dei suindicati mezzi si servì primieramente Réaumur in Francia nel 1730, indi Delisle a Pietroburgo nel 1733 — Réaumur volle che ogni grado del suo termometro disegnasse la millesima parte del volume che il liquido occupava alla temperatura del ghiaccio in fusione ; e sperimentando su diverse mescolanze di acqua e spirito di vino trovò che prendendo 5 parti di spirito rettificato del commercio ed 1 di acqua , si ha un liquido il cui massimo volume prima di bollire sta a quello corrispondente alla fusione del ghiaccio come 1080 a 1000. Quindi adottò la scala da 0° ad 80°.

Sul termometro di Delisle lo zero della scala corrispondeva al calore dell'acqua bollente , e di là progrediva verso la temperatura del ghiaccio in fusione; e questa inversa numerazione di gradi egli adottava per distruggere il falso concetto che lo zero dei termometri significasse un'assoluta privazione di calore. Scelse per corpo termometrico il mercurio, e volle che ogni grado della sua scala corrispondesse ad un diecimillesimo del volume che prende il mercurio al calore dell'acqua bollente. E polchè dietro ricerche appositamente eseguite egli aveva trovato che dall'acqua bollente al ghiaccio che si fonde il mercurio si contrae nella ragione di 10150 e 10000 [1], così adottò una scala di 150 gradi, l'ultimo dei quali corrispondeva al calore del ghiaccio in fusione.

[1] Secondo le sperienze di Dulong e Petit il mercurio dalla fusione del ghiaccio all'acqua bollente si dilata di $\frac{1}{64,8}$ del suo volume a 0°. Quindi se rappresentiamo con 64,8 questo volume, la sua espressione alla temperatura dell'acqua bollente sarà 65,8 ; e da questo al ghiaccio in fusione la sua contrazione sarà di $\frac{1}{65,8}=0,01519$, valore che differisce di circa 2 diecimillesimi da quello ottenuto da Delisle.

Comparazione delle scale.

73. La scala di Delisle non è stata adottata dai fisici. Quelle di Fahrenheit, di Réaumur e di Celsus sono tuttavia in uso; ma il limite inferiore della scala di Fahrenheit ed il limite superiore di quella di Réaumur non vanno più stabiliti, come fecero i loro inventori. Essendosi conosciuto che lo zero del termometro Fahrenheit giace 32 gradi della stessa scala sotto al punto del ghiaccio in fusione, la gradazione di questo termometro si ottiene dividendo in 180 parti eguali l'intervallo tra i punti dell'acqua bollente e della fusione del ghiaccio, e poi continuando la scala al disotto dell'ultimo limite per altre 32 parti. Rispetto poi alla scala di Réaumur, quando si voglia usare per un termometro a mercurio, se ne avrà il limite superiore immergendolo nell'acqua bollente; ma se si trattasse di un termometro a spirito di vino, che certamente non potrà tollerare una temperatura così alta, allora dopo averne determinato lo zero al modo consueto, se ne avrebbe la gradazione, che d'ordinario non eccede il 50mo grado, immergendolo con un buon termometro a mercurio in un bagno gradatamente riscaldato.

Or l'intervallo tra la fusione del ghiaccio e l'ebollizione dell'acqua essendo pei tre termometri, di Celsus, Réaumur e Fahrenheit, rispettivamente diviso in 100, 80 e 180 parti eguali, egli sarà facile tradurre le indicazioni date da uno qualunque dei tre termometri in quelle che si sarebbero ottenute da ciascuno degli altri due, prendendo norma dalle seguenti basi di comparazione:

$$1^\circ C = \tfrac{4}{5} R = \tfrac{9}{5} F,$$
$$1^\circ R = \tfrac{5}{4} C = \tfrac{9}{4} F,$$
$$1^\circ F = \tfrac{5}{9} C = \tfrac{4}{9} R.$$

È d'uopo purtuttavia avvertire che prima di servirsi di queste relazioni per tradurre i gradi dati dal termometro di Fahrenheit in quelli di Réaumur o di Celsus, bisogna diminuirne il numero di 32; come viceversa si dovrebbe accrescere di 32 il numero ottenuto dalle stesse relazioni, qualora si volessero tradurre in gradi di Fahrenheit le temperature segnate dai termometri di Réaumur e di Celsus.

74. Supponiamo un termometro, la cui pallina sia stata soffiata e riempita di mercurio molto tempo prima di aver segnati sul cannello i punti della fusione del ghiaccio e del bollimento dell'acqua. In qualunque tempo ed in qualunque luogo un termometro siffatto s'immerga nel ghiaccio che si fonde, si vedrà il mercurio scendere allo zero della scala. Dunque l'energia termica, necessaria alla fusione del ghiaccio, è sempre ed ovunque la stessa. Dei punti fissi della scala.

Ma non può dirsi altrettanto del punto superiore della scala, ossia di quello determinato dall'acqua bollente. In due recipienti metallici eguali di forma e dimensioni, ed egualmente pieni di acqua tolta dalla stessa sorgente, s'immergano due termometri che vadano perfettamente di accordo. Situati i due recipienti, l'uno sul suolo e l'altro su di un alto terrazzo, si riscaldino contemporaneamente fino a far bollire l'acqua che vi è contenuta: allora si vedrà che il termometro immerso nel recipiente che giace sul suolo, segna una temperatura più elevata. Questa influenza della pressione atmosferica sul grado di calore posseduto dall'acqua che bolle, fu primieramente osservata dagli accademici del Cimento, indi rifermata dalle esperienze di Boyle; e perciò Deluc nel 1762 avvertiva i fisici a voler tener conto della pressione atmosferica nel determinare il punto dell'acqua bollente sulle scale dei termometri. La qual cosa potrà facilmente attuarsi in conseguenza delle ricerche all'uopo eseguite da Wollaston; il quale ha trovato che ritenendo come normale la pressione dell'aria equivalente al peso di una colonna di mercurio alta $0^m,760$, un cangiamento di $0^m,0275$ nel valore di essa pressione apporta la variazione di 1° centesimale nella temperatura dell'acqua bollente.

Fa d'uopo intanto osservare esser necessario per la determinazione dei due punti fissi della scala che non solamente la pallina ma tutta la porzione di cannello occupata dal mercurio sia sottoposta all'azione del ghiaccio ed a quella dell'acqua bollente. Bisognerebbe in conseguenza far uso di un profondo recipiente, qualora il cannello fosse alquanto lungo: la qual cosa menerebbe seco l'inconveniente di aver nello strato inferiore

dell'acqua, come quello ch'è maggiormente premuto, una temperatura più elevata che nello strato superiore; e la differenza salirebbe a circa un mezzo grado per un cannello termometrico lungo 2 decimetri.

Ad evitare questa cagione di errore si usa esporre il termometro al vapore dell'acqua bollente anzichè immergerlo in questa, e ciò per mezzo dell'apparecchio rappresentato dalla Fig. 80. Ivi il termometro rimane sospeso per mezzo di un turacciolo di sughero che chiude la bocca del recipiente; ed il vapore che si eleva dalla poca acqua che giace sul fondo e che si fa bollire sottoponendovi una lucerna a spirito di vino, circuisce la pallina e presso che tutto il cannello termometrico.

Questa pratica fu suggerita dai membri della Società Reale di Londra, che dietro invito di Deluc verificarono le sperienze di Boyle relative all'influenza della pressione atmosferica sul grado di calore dell'acqua bollente. Ed essi furono a ciò indotti dall'aver osservato che la colonna termometrica oscilla sotto l'azione immediata dell'acqua bollente, e si eleva tranquillamente sotto quella del vapore.

Spostamento dello zero.

75. Il Canonico Bellani fu primo ad osservare che lo zero dei termometri, qualche mese dopo la loro costruzione, suol trovarsi alquanto elevato e talvolta di oltre un grado. Egli vide subito la stretta relazione che questo fatto aveva col fenomeno delle *lagrime batave*; imperocchè prima che sia determinato lo zero di un termometro, il vetro ha dovuto successivamente soffrire e l'alta temperatura necessaria alla formazione della pallina, e quella che si è richiesta per espellere l'aria e l'umidità dal mercurio introdotto. Se dunque tra queste due operazioni e la determinazione dello zero non è corso un tempo sufficiente, le molecole degli strati interiori non si troveranno di aver preso il loro assetto normale, quando la pallina sarà circondata di ghiaccio. Quindi è che lo spostamento dello zero non si osserva nei termometri, in cui si è determinato molto tempo dopo averli riempiti di mercurio; e perciò nel n° 74 noi abbiamo supposta questa condizione per eseguire l'esperimento ivi indicato.

E non contento dell'analogia, il Bellani volle sottoporre ad una pruova decisiva la realtà del suo concetto. Egli soffiò una pallina di vetro, la riempì di mercurio e la chiuse coll'azione di una fiamma; indi la pesò due volte nell'acqua, frapponendo l'intervallo di un anno tra le due pesate, e nella seconda ottenne un peso maggiore di quello che aveva avuto nella prima. La qual cosa dimostra, come vedremo allorchè sarà parola dell'equilibrio dei solidi immersi nei liquidi, che durante l'anno d'intervallo il volume della pallina era diminuito.

Più tardi Flaugerques in Francia osservava lo stesso fatto già conosciuto e spiegato per opera del Bellani, e lo attribuiva alla compressione che il peso atmosferico produce sul termometro privo internamente di aria pel fatto stesso della sua costruzione. Ma il fenomeno dello spostamento dello zero essendosi avverato in termometri lasciati a bello studio aperti, la spiegazione del fisico francese è divenuta inammisibile.

76. Sotto questa denominazione comprendiamo i termometri di Borda, Bréguet ed Holzmanns. Termometri metallici.

All'occasione del gran lavoro geodetico, eseguito in Francia sul finire dello scorso secolo, per misurare l'arco di meridiano compreso tra Dunkerque e Perpignano, Borda propose come riga metrica una verga parallelepipeda di platino lunga 12 piedi, sulla quale stavane adagiata un'altra di rame e più corta. Le due verghe, che in un estremo erano fermate con vite (Fig. 87) furono successivamente immerse in un bagno di neve pesta ed in un altro di acqua bollente, e sulla verga di platino si segnarono i luoghi ove giungeva l'estremità libera della verga di rame. Lo spazio compreso tra quei due limiti fu diviso in 100 parti eguali mercè sottilissimi solchi, visibili soltanto coll'aiuto di una lente d'ingrandimento. Così il sistema delle due verghe componeva un termometro, che dava la temperatura della verga di platino mercè la linea di divisione a cui corrispondeva l'estremità libera della verga di rame; e la conoscenza della temperatura della riga metrica è un dato di somma importanza nella misura di una base geodetica.

I fratelli Bréguet, celebri per la perfezione dei loro crono-

metri, hanno costruito un sensibilissimo termometro con tre lamine di platino, oro ed argento, sovrapposte l'una all'altra, e ridotte col laminatoio ad un nastro metallico non più doppio di $\frac{1}{50}$ di millimetro. Questo nastro (Fig. 90), girato ad elica coll'argento alla faccia interna ed il platino all'esterna, è sostenuto in un capo e porta nell'altro un indice leggiero, mobile sulla circonferenza di un cerchio diviso in 100 parti eguali. L'argento essendo più dilatabile del platino, le spire dell'elica si allargono coll'accrescimento di temperatura e si restringono col raffreddamento; quindi l'indice prende opposti movimenti.

L'alto grado di conducibilità dei metalli componenti la spira, la sua piccola massa e l'estesa superficie che presenta al mezzo ambiente, rendono ragione della prontezza di questo termometro in rilevare i menomi e fugaci cangiamenti di temperatura. I fratelli Bréguet posero il loro termometro con un altro a mercurio sotto una campana pneumatica della capacità di circa 5 litri. L'aria aveva la temperatura di 19.C; fatto rapidamente il voto, il termometro a mercurio non si abbassò che di 2 gradi, mentre l'altro era disceso a —4C. Indi fecero rientrare l'aria, ed allora il termometro metallico risalì rapidamente a 50°, e quello a mercurio continuava tuttavia a discendere.

Con un simile sistema di lamine composte Holzmanns ha costruito un termometro a forma di oriuolo tascabile, e perciò denominato *termometro a quadrante*. Il pezzo principale è una duplice lamina di platino e rame, o di ferro e rame, fermata in *a* (Fig. 89), curvata in *b* e libera in *c*. Con questo estremo essa preme continuamente contro il braccio corto di una leva mobile in *s*, il cui braccio lungo mediante l'arco dentato *nn'* ingrana con un piccolo rocchetto che porta l'indice *li*: al rocchetto è poi fermato un capo della molle *e*, che tiene l'estremità *c* della duplice lamina a continuo contatto col braccio corto della leva. E l'inflessione della lamina in *b* dovendo variare a norma della quantità di calore, egli è facile comprendere che l'indice dovrà muoversi in opposte direzioni, secondochè la temperatura sarà crescente o decrescente.

77. Si dà oggi questo nome agli strumenti termometrici destinati alla misura delle più alte temperature, come ad esempio sarebbe quella di un forno di fusione. Dopo il pirometro costruito da Wegdwood nel 1782, vennero quelli di Guyton-Morveau, di Prinsep, di Daniell, ecc ; ma all'infuori del *pirometro ad aria* di Pouillet, che in appresso descriveremo, nessuno degli altri pare che sia più soddisfacente di quello di Wegdwood. Pirometri.

La costruzione di questo pirometro poggia sulla proprietà che ha l'argilla di contrarsi [1] a misura che prende più alta temperatura. Wegdwood preparava dei cilindri di questa sostanza, lunghi 14 a 15 millimetri col diametro di 12; e li poneva in un crogiuolo insieme al metallo di cui voleva conoscere la temperatura di fusione. Appena questa era avvenuta, egli ritirava il cilindro di argilla, lo lasciava raffreddare, e poi ne misurava la contrazione nel seguente modo. Sopra una lamina di rame stavano fermati due regoli dello stesso metallo lunghi 304 millimetri, e lo erano in modo da costituire un canaletto largo 12 millimetri da un lato ed 8 nell'altro. Quindi è che il cilindro di argilla che vi era introdotto, vi poteva penetrare tanto più innanzi, quanta maggior contrazione aveva sofferto, ossia quanta più alta temperatura aveva sperimentato. E perchè questo riscontro fosse stato più agevole, uno dei regoli stava diviso in 240 parti eguali, ch'erano altrettanti gradi del pirometro. Non ostante l'arbitraria divisione di questa scala,

[1] Questa proprietà dell'argilla può dipendere, fino ad un certo grado di calore, dall'evaporazione dell'acqua ch'essa contiene, poichè vi si trova un peso decrescente, come più alta è stata la temperatura che ha sofferta. Ma intanto la diminuzione di peso trova un limite senza che la contrazione cessi di aver luogo; la qual cosa i chimici spiegano coll'attribuirla a più intima combinazione dell'allumina colla silice, che sono i componenti principali dell'argilla. Del resto, qualunque sia la cagione del fenomeno, gioverà conoscere che quando l'argilla ha sofferto un alto grado di calore e poi si è lasciata raffreddare, per ogni altra temperatura inferiore si dilaterà invece di contrarsi. Donde si rileva che i cilindri di questa sostanza che sono stati già adoperati per l'uso pirometrico, non potranno servire una seconda volta, se la temperatura non sia più elevata della prima.

e quindi la difficoltà di compararla a quelle degli ordinarii termometri, i fisici inglesi ammettono le seguenti relazioni.

Wedgwood.	Fahrenheit.
2°	642°,75
3	705 ,26
7	955 ,28
22	1822 ,67
27	2205 ,18
32	2517 ,63
95	6508 ,89
130	8696 ,24
155	9633 ,68
160	10517 ,12
175	11454 ,56

CAPO QUARTO.

MISURA DELLE DILATAZIONI.

78. La dilatazione operata dal calore, dicesi *lineare* o *cubica*, secondochè si considera in una o nelle tre dimensioni del corpo dilatato. Definizioni.

Se gli aumenti delle dimensioni risultano proporzionali ai gradi di temperatura, la dilatazione si dirà *uniforme*; e si dirà *varia* nel caso opposto. Così tra 0° e 100° si è trovato essere uniforme la dilatazione dei metalli, e varia quella dell'acqua.

Or da questa idea della dilatazione uniforme deriva che conoscendone la quantità pel passaggio da 0° a 1°, si avrà quella corrispondente a t gradi, moltiplicando la prima per t. Laonde se dinotiamo un V_0 e V_t i volumi di un corpo alle temperature 0° e t°, e con k l'aumento dell'unità di volume nel passare da 0° a 1°, avremo:

$$V_t = V_0 + V_0 kt = V_0(1 + kt) ;$$

quindi:

$$V_0 = \frac{V_t}{1+kt}, \quad k = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \quad t = \frac{V_t - V_0}{V_0 k}.$$

Le quali formole danno il valore di una delle quattro quantità V_0, V_t, k e t, quando le altre tre son date. E se nelle stesse formole si pongano i simboli L_0, ed L_t invece di V_0 e V_t, si avranno quelle relative alla dilatazione lineare.

L'aumento k che prende l'unità di misura nel passare da 0° a 1°, si denomina *coefficiente di dilatazione*, e riceve gli aggiunti di *lineare* o *cubico*, secondochè esprime dilatazione in lunghezza o in volume.

Rispetto poi alla dilatazione varia non può ammettersi che un *coefficiente medio*, il quale si avrà dividendo per t l'accrescimento dell'unità di misura nel suo passaggio da 0° a t°.

Nei corpi liquidi ed aeriformi si deve ancora distinguere la *dilatazione assoluta* dall'*apparente*. Colla prima si vuol significare l'effettivo aumento del volume fluido, mentre la seconda non è che la differenza tra questo aumento e quello avvenuto nella capacità del recipiente. Donde si rileva, perchè un termometro ad acqua ed a grande serbatoio, immerso in una massa bollente dello stesso liquido, presenti un istantaneo abbassamento della colonna liquida al momento dell'immersione: è appunto la capacità del serbatoio che si è aumentata, prima che il calore abbia potuto dilatare il liquido termometrico.

I fluidi avranno dunque un coefficiente di dilatazione assoluta ed un altro di dilatazione apparente; chiamiamo il primo k, il secondo k'; sia h il coefficiente della dilatazione cubica del recipiente, e rappresenti V_0 il volume fluido a 0°. Passando da questa temperatura a 1°, il volume fluido sarà divenuto apparentemente $V_0(1+k')$; e poichè questo volume per la dilatazione del recipiente si è accresciuto nel rapporto di 1 a $1+h$, così la sua vera espressione sarà $V_0(1+k')(1+h)$. Ma lo stesso volume dev'essere ancora rappresentato da $V_0(1+k)$; starà dunque l'equazione:

$$(1+k')(1+h)=1+k\ ,$$

la quale, trascurandone il termine hk' come di piccolissimo valore, diviene:

$$k'+h=k.$$

Vale a dire che il coefficiente di assoluta dilatazione di un fluido è prossimamente eguale alla somma del suo coefficiente di dilatazione apparente più quello della dilatazione cubica del recipiente.

Relazione della dilatazione cubica alla lineare nei corpi d'uniforme coesione.

79. Poichè la dilatazione di un corpo risulta dalla preponderanza della ripulsione termica sulla coesione molecolare, ne segue che se questa è costante in ogni senso, l'allungamento dell'unità lineare dovrà essere lo stesso sopra ciascuna dimensione del corpo. E perciò se indichiamo con δ questo allungamento nel passaggio da 0° ad 1°, per lo stesso intervallo di temperatura l'unità di volume del corpo diverrà:

$$(1+\delta)^3 = 1+3\delta+3\delta^2+\delta^3.$$

E poichè di δ, che è sempre una piccolissima frazione, sono trascurabili le potenze superiori alla 1ª, così avremo:

$$(1+\delta)^3 = 1+3\delta;$$

vale a dire che pei corpi d'uniforme coesione la dilatazione cubica è tripla della dilatazione lineare.

Questa relazione, per la quale la figura del corpo rimane simile a se stessa in un cangiamento di temperatura, non ha luogo che nei corpi amorfi ed in quelli che quantunque cristallizzati, non hanno potere birifrangente [1]. Mitscherlich immergendo un cristallo di spato islandico in un bagno riscaldato da 0° a 100°, trovò che gli angoli ottusi delle facce romboidali del cristallo erano diminuiti di 8′, 30″, e di altrettanto accresciuti gli angoli acuti; dimodochè sotto l'aumento di temperatura il corpo tendeva a prendere la forma cubica. Sull'ottenuta variazione angolare delle facce egli calcolò la dilatazione lineare del solido nel senso dell'asse, e l'ebbe eguale a 0,00342. Questo risultamento, che dava alla dilatazione cubica dello spato un valore troppo grande rispetto a quella degli altri solidi, lo indusse a determinarla direttamente. Egli e Dulong posero dei pezzi di spato in un tubo di vetro pieno di mercurio, ed a cui erane saldato un altro assai sottile: riscaldarono questo apparecchio da 0 a 100°, e dalla quantità di mercurio che n'era uscito, argomentarono che lo spato si era dilatato di 0,001961. Or comparando questo numero al precedente, ne risultava che se lo spato erasi dilatato nel senso dell'asse, si era viceversa contratto in direzione perpendicolare all'asse; e Mitscherlich misurando con uno sferometro la doppiezza di una lamina di spato tagliata parallelamente all'asse, trovò che realmente diminuiva a misura che la temperatura si elevava.

Misura della dilatazione dei solidi.

80. Primieramente gli Accademici del Cimento, indi Mus-

[1] Vedremo nell'OTTICA che il fenomeno della doppia rifrazione suppone necessariamente una coesione varia nelle diverse direzioni.

chenbroeck si occuparono della dilatazione dei solidi; ma le loro sperienze, buone in quanto che raffermarono la generalità del fatto della dilatazione, si trovarono non esser state eseguite con quella precisione che si richiede per ottenere un' esatta misura. Migliori ricerche si ebbero in seguito per opera di Ellicot e Smeaton in Inghilterra, indi da Lavoisier e Laplace in Francia. Le sperienze di questi due fisici francesi furono eseguite secondo il metodo proposto da Muschenbroeck, di appoggiare cioè una estremità della verga, da sottoporsi ad esperimento, ad un ostacolo inamovibile, mentre l'altra estremità preme il braccio corto di una leva, il cui braccio lungo facendo da indice rende più sensibili le variazioni di lunghezza della verga. L' apparecchio, che usarono, è rappresentato dalla fig. 64. In una cassa rettangolare metallica AB giaceva la verga *st*, su cui si voleva sperimentare, e che poggiando contro la lamina di vetro *ei* era sostenuta da due rotoli anche di vetro, portati da due coppie di lamine *nn* della medesima sostanza. Queste lamine erano fermate alle spranghe *cb* sostenute da quattro pilastri; e l'estremità *t* della verga, quando il calore ne faceva crescere la lunghezza, spingendo l' estremo *z* dell' asta di vetro *zh*, faceva rotare intorno ad *xy* un cannocchiale *k*, con cui si traguardava una mira situata a 100 tese. Le proporzioni dell'apparecchio erano tali che quando la verga dilatandosi si allungava di una linea, l' asse del cannocchiale si moveva per 740 divisioni sulla linea di mira. In questo modo rendevasi sensibile un allungamento di $\frac{1}{740}$ di linea; e poichè le verghe adoperate erano lunghe 6 piedi, così poteva valutarsi un'alterazione di $\frac{1}{740\,.\,6\,.\,144}=\frac{1}{657690}$ della loro totale lunghezza. Aggiungasi che la cassa era piena di acqua, e che la temperatura di questo liquido, che si faceva variare da 0° a 100°, era data da più termometri, su cui potevasi osservare anche il decimo di grado.

Da siffatti esperimenti i due fisici francesi rilevarono: — 1° Che un corpo, la cui temperatura va da 0° all'acqua bollente e

poi torna a 0°, riacquista le sue prime dimensioni. — 2° Che tra questi limiti di temperatura il vetro ed i metalli, su cui sperimentarono, ebbero dilatazioni proporzionali ai gradi di calore indicati dal termometro a mercurio. — 3° Che la dilatazione dell'acciaio temperato è decrescente; di che è facile rendersi ragione, qualora si consideri che l'acciaio temperato è meno denso e più dilatabile del non temperato, ed in conseguenza, ricuocendosi coll'aumento del calore, perde nel tempo stesso di volume e di dilatabilità. — 4° Che i corpi composti hanno un coefficiente di dilatazione, vario a norma della natura dei loro elementi; ne offrirono esempii il vetro ed il ferro del commercio.

Corpi messi a pruova da Lav. e Lap.	*Loro dilatazione lineare da 0° a 100°.*
Flint-glass inglese	0,00081166
Vetro di Francia con piombo	0,00087199
Tubi di vetro senza piombo	0,00087572 0,00089760 0,00091751
Acciaio non temperato.	0,00107875 0,00107956
Acciaio temperato giallo ricotto a 30° R. Dilatazione osservata fino a 30°	0,00136900 0,00138600
Acciaio ricotto a 65°. R.	
Dilatazione osservata a 65° R.	0,00129300
Ferro dolce lavorato alla fucina	0,00122045
Ferro rotondo passato per filiera	0,00123504
Oro puro	0,00146606
Oro al titolo di Parigi: ricotto.	0,00151361
non ricotto.	0,00155155
Rame	0,00171222 0,00172244
Ottone.	0,00186671 0,00188971
Argento al titolo di Parigi	0,00190868
» di coppella	0,00190974
Stagno delle Indie o di Melac	0,00193765
Stagno di Falmouth	0,00217298
Piombo	0,00284836

A questa tavola aggiungiamo la dilatazione dello zinco secondo Smeaton e quella del platino misurata per la prima volta da Borda.

Zinco	0,00311
Platino.	0,00085655

Al metodo meccanico escogitato da Muschenbroeck per ingrandire gli effetti della dilatazione lineare, Ramsden sostituì la misura diretta mediante un sistema micrometrico, evitando nel tempo stesso gli errori di contatto, da cui sogliono essere affette le ricerche di questo genere. Il suo apparecchio componevasi di tre casse rettangolari, parallelamente situate, A,B,C, (Fig. 66): nella cassa di mezzo giaceva la verga metallica da mettersi a pruova; due verghe simili giacevano nelle casse laterali. Ciascuna delle tre verghe aveva due appendici ad angolo retto, di cui quelle di A portavano i sistemi oculari di due microscopii, quelle di B ne avevano gli obbiettivi, e nei fuochi di questi stavano dei fili incrociati nelle appendici di C. Egli cominciava dal portare le tre verghe alla temperatura 0° circondandole di ghiaccio pesto, e faceva che a questa temperatura restassero per tutta la durata dell'esperimento le verghe situate nelle casse estreme A e C. La temperatura poi della cassa media per mezzo di sottoposte lucerne veniva successivamente aumentata, e come la dilatazione trasportava gli obbiettivi fuori gli assi degli oculari, così il movimento di una vite micrometrica, che ve li riduceva, dava la misura dell'effettuito allungamento. I coefficienti così ottenuti da Ramsden riuscirono prossimamente eguali a quelli già trovati da Lavoisier e Laplace.

Se la dilatazione dei solidi si è mostrata uniforme tra 0° e 100°, non può dirsi altrettanto per temperature assai più elevate, Dulong e Petit, sperimentando sotto questa veduta su verghe di vetro, ferro, rame e platino, hanno ottenuto i risultamenti che seguono:

Intervallo di temperatura.	Dilatazione lineare per 1° centesimale.			
	Vetro.	*Ferro.*	*Rame.*	*Platino.*
Da 0° a 100°. . . .	0,00000863	0,00001182	0,00001718	0,00000884
— 0° a 300°. . . .	0,00001203	0,00001468	0,00001883	0,00000918

81. Sappiamo (n°78) la dilatazione dei liquidi poter essere apparente o assoluta. Per determinare la prima prendasi un tubo di vetro esattamente cilindrico (ciò che si rileverà dal vedere se una piccola colonna di mercurio in esso introdotta, occupi ovunque una stessa lunghezza) ; e fattolo terminare con una pallina, si divida in parti di eguale lunghezza e quindi di eguale capacità. Si pesi il tubo così preparato, e poi si torni a pesare dopo averlo ripieno di mercurio fino all' origine delle divisioni; la differenza dei due pesi farà conoscere il peso del mercurio contenuto nella pallina e nella parte indivisa del tubo, che insieme costituiscono il serbatoio dell'apparecchio. Allora si aggiunga nuovo mercurio, e si torni a pesare; la differenza di questo terzo peso dal secondo rappresenterà quello del mercurio contenuto nelle *n* divisioni del tubo che ne saranno occupate, e che diviso in conseguenza per *n* farà conoscere il peso del mercurio contenuto in una divisione. Essendo così noti i pesi delle masse di mercurio contenute nel serbatoio ed in una qualunque delle divisioni, è chiaro che il loro rapporto esprimerà quello dei loro volumi; e che in conseguenza ponendo $=1$ la capacità di una divisione, l' indicato rapporto ci darà l'espressione numerica della capacità del serbatoio.

Misura della dilatazione apparente dei liquidi.

Allora si empirà la pallina, con un certo numero di divisioni del tubo, del liquido su cui si vorrà sperimentare; lo si farà bollire per cacciarne l' aria che ne ingrandirebbe la dilatazione ; indi si chiuderà l' orifizio del tubo alla lampada dello smaltatore. Ciò fatto, si circonderà di ghiaccio pesto la pallina e la porzione di tubo occupata dal liquido ; e quando non siavi ulteriore contrazione, si prenderà nota del volume V_0 che

allora il liquido occuperà nel tubo. Indi si porterà in un bagno caldo ad una certa temperatura t, e si segnerà il corrispondente volume liquido V_t. Così, chiamando k il coefficiente della dilatazione apparente del liquido, si avrà:

$$V_t - V_0 = V_0 kt,$$

donde:
$$k = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}.$$

A questo modo Lavoisier e Laplace determinarono il coefficiente della dilatazione apparente del mercurio, che trovarono $= \frac{1}{6300}$.

In seguito Dulong e Petit tennero altra via, a fine di ottenere migliori risultamenti. Essi empirono di mercurio ben secco ed alla temperatura 0° un cilindro di vetro terminato da un sottile tubo ricurvo; lo posero in un bagno che riscaldarono da 0 a 100°, e raccolsero in una vaschetta il mercurio che la dilatazione espelleva dal tubo. Chiamando P il peso del mercurio residuo nel tubo e p quello del mercurio uscito, V_t il volume apparente del mercurio a 100° e V_0 il suo volume primitivo, è chiaro doversi avere la relazione:

$$V_t : V_0 = P + p : P,$$

donde:
$$\frac{V_t - V_0}{V_0} = \frac{p}{P}.$$

Quindi risultava il coefficiente della dilatazione apparente del mercurio:

$$\delta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t} = \frac{p}{Pt},$$

e che trovarono $= \frac{1}{6480}$.

E poichè conosciuto δ l'equazione precedente farà noto il valore di t, così lo stesso apparecchio, come *termometro a peso*, fu adoperato da Dulong e Petit quando la considerevole profondità di una massa liquida riscaldata richiedeva un termometro a lungo serbatoio.

Giova pertanto osservare che la dilatazione apparente di un liquido dovrà esser sempre dipendente dall'assoluta dilatazione del suo recipiente; dimodochè i coefficienti ottenuti da Lavoisier e Laplace, e da Dulong e Petit, a rigore non si potranno riguardare esatti che per le specie di vetro da essi adoperate. Intanto una divergenza sotto questo riguardo non potrebbe essere che piccolissima, stante che le dilatazioni cubiche delle specie di vetro finora considerate, son comprese tra 0,0020 e 0,0027.

82. Conosciuta la dilatazione cubica di un recipiente e la dilatazione apparente del liquido contenuto, la loro somma darà la dilatazione assoluta dello stesso liquido. Così Lavoisier e Laplace determinarono il coefficiente dell'assoluta dilatazione del mercurio tra 0° e 100°, e l' ebbero $=\frac{1}{5521}$. Misura della dilatazione assoluta dei liquidi.

Più tardi Dulong e Petit seguirono un metodo indipendente dalla dilatazione del recipiente e che era stato già proposto da Boyle. Essi unirono con un tubo capillare *m Cn* (Fig. 74) voltato due volte ad angolo retto, due recipienti cilindrici A e B di egual diametro interno. Fermato verticalmente l' apparecchio, lo riempirono di mercurio che rimaneva ad una stessa altezza nei due recipienti, finchè vi si trovava ad una medesima temperatura. Indi circondarono il braccio AD (Fig. 79) del tubo ricurvo con un largo cilindro di vetro pieno di ghiaccio pesto, a fine di conservarlo alla temperatura 0°, ed introdussero l'altro braccio BC in una caldaia cilindrica piena di un olio fisso che senza bollire poteva riscaldarsi oltre i 300 gradi. Questa temperatura era data da due termometri, *i* e *t*, il primo ad aria ed il secondo a peso.

La capillarità del tubo di comunicazione *mCn* (Fig. 74) impediva la produzione delle correnti che avrebbero trasportato il mercurio freddo in BC ed il caldo in AD. Quindi il liquido, per una legge ch'esporremo nel Libro seguente, doveva elevarsi nelle due braccia del tubo ad altezze inversamente proporzionali alle densità che ivi aveva. Indicando con d_0 e d_t le densità del mercurio in AD e BC, con k_0 e k_t le corrispondenti al-

tezze, che erano valutate per mezzo di un catetometro; si aveva:

$$k_t : k_0 = d_0 : d_t.$$

Ma l'unità di massa del mercurio dovendo occupare dei volumi v_t e v_0 inversamente proporzionali alle densità d_t e d_0, si aveva ancora la relazione:

$$v_t : v_0 = d_0 : d_t.$$

Dalle quali due proporzioni eliminando il rapporto comune $d_0 : d_t$, ne risultava:

$$v_t : v_0 = k_t : k_0 ;$$

donde:

$$\frac{v_t - v_0}{v_0} = \frac{k_t - k_0}{k_0}.$$

E così la dilatazione assoluta $\frac{v_t - v_0}{v_0}$ tra i gradi di temperatura 0° e t° si otteneva per mezzo dei valori numerici delle altezze k_t e k_0.

In tal modo Dulong e Petit trovarono che il mercurio per ogni grado del termometro centigrado si dilata in valore medio:

da 0° a 100° di $\frac{1}{5550}$

da 100° a 200° di $\frac{1}{5425}$

da 200° a 300° di $\frac{1}{5300}$.

Formole per la dilatazione dei liquidi.

83. Se la dilatazione dei metalli e del vetro può riguardarsi come uniforme tra 0° e 100°, quella dei liquidi non potrà considerarsi allo stesso modo se non tra limiti di temperatura assai più ristretti. Quindi è che se indichiamo con 1 il volume di un liquido a 0° e con V_t lo stesso volume alla temperatura t°, fa d'uopo che non sia troppo grande l'intervallo da 0° a t°, perchè vi si possa utilmente applicare la formola:

$$V_t = 1 + at,$$

che conviene alla dilatazione uniforme. Per ogni altro valore di t bisognerà ricorrere alla formola:

$$V_t = 1 + at + bt^2 + ct^3 ,$$

determinando con accurati sperimenti i valori costanti a, b, c; od anche all'altra:

$$V_t = 1 + at + bt^2 ,$$

quando la dilatazione del liquido non sia molto varia. Così Regnault ha trovato che la dilatazione del mercurio tra 0° e 350° è rappresentata con sufficiente esattezza della formola:

$$V_t = 1 + 0{,}000179007t + 0{,}0000000252316t^2 ,$$

da cui si hanno i valori:

$V_0 = 1{,}000000$	$V_{200} = 1{,}036811$
$V_{50} = 1{,}009013$	$V_{250} = 1{,}046329$
$V_{100} = 1{,}018153$	$V_{300} = 1{,}055973$
$V_{150} = 1{,}027419$	$V_{350} = 1{,}065743.$

Or dal valore di V_{100} risulta pel coefficiente di dilatazione del mercurio tra 0° e 100° il numero $\frac{1}{5508}$ che si approssima meglio al coefficiente dato da Lavoisier e Laplace che all'altro ottenuto da Dulong e Petit.

Al contrario pei liquidi che hanno una dilatazione assai varia, non solo fa d'uopo usar la formola a quattro termini, ma restringerla ancora tra certi limiti di temperatura. Così Kopp non ha potuto rappresentare il volume dell'acqua tra 0° e 100°, se non componendo le quattro seguenti formole:

$$1^a \ldots V_{25}^{0} = 1 - 0{,}000061045t + 0{,}0000077183t^2 - 0{,}00000003734t^3$$

$$2^a \ldots V_{50}^{25} = 1 - 0{,}000065415t + 0{,}0000077587t^2 - 0{,}000000035408t^3$$

$$3^a \ldots V_{75}^{50} = 1 + 0{,}00005916t + 0{,}0000031849t^2 + 0{,}0000000072848t^3$$

$$4^a \ldots V_{100}^{75} = 1 + 0{,}00008645t + 0{,}0000031892t^2 + 0{,}0000000024487t^3 ;$$

nelle quali i numeri segnati a lato di V indicano i limiti di temperatura tra cui la formola è applicabile.

Rispetto poi alle temperature inferiori a 0° Frankenheim,

poggiando sulle ricerche di Pierre intorno alla dilatazione dell'acqua, è pervenuto alla formola:

$$5^a \ldots V^{0}_{-12} = 1 - 0{,}00009417t + 0{,}000001449t^2 - 0{,}0000003983t^3.$$

E per mezzo di queste cinque formole è stata calcolata la seguente tavola pel volume dell'acqua tra —15° e +100°.

t	V	t	V
— 15°	1,003738	40°	1,007561
— 10	1,001685	50	1,011766
— 5	1,000582	60	1,016590
0	1,000000	70	1,022246
5	0,999883	80	1,028581
10	1,000124	90	1,035397
20	1,001567	100	1,042986
30	1,004064		

Massima densità dell'acqua.

84. Prendasi un ordinario tubo termometrico a serbatoio piuttosto grande, e riempitolo in gran parte di acqua, si segni l'altezza a cui il liquido rimane nel cannello. Indi si circondi il serbatoio di ghiaccio pesto mescolato a sal comune, e si cominci ad osservare l'andamento dell'acqua nel cannello. Si vedrà lentamente scendere e con una velocità sempre minore, fino ad arrestarsi per un momento, per quindi salire di bel nuovo. In questo ritorno il liquido procederà sulle prime con lentezza, poi con celerità crescente, finchè o schizzerà con un getto dall' orifizio del tubo (ciò che mi è accaduto di osservare una sola volta) o si fermerà dietro lo scoppio del serbatoio che si troverà allora coverto sulla faccia interna di una pellicola di ghiaccio.

Da questo procedimento del fenomeno chiaramente apparisce che l' acqua prima di congelarsi tocca una massima diminuzione di volume. Volendo conoscere la temperatura del liquido in quel momento, potrebbe per avventura credersi che bastasse conoscerne il grado di calore nell'istante della massima discesa nel cannello dell' apparecchio. Ma questa sarebbe

una falsa determinazione, stante la parte che vi prende la contrazione del vetro. Ed in vero immaginiamo diviso in un numero grandissimo n di parti eguali l'intervallo di temperatura tra il grado di ebollizione e quello corrispondente al volume minimo dell'acqua; siano α_1, α_2, α_3,.... le successive diminuzioni di volume che il liquido patisce raffreddandosi pei consecutivi n intervalli, per ognun dei quali sia β il costante ristringimento della capacità interiore dell'apparecchio. Poichè il liquido raffreddandosi scende nel tubo, è d'uopo che sia $\beta < \alpha$; ma la serie α_1, α_2, α_3,.... è decrescente fino ad aver zero per ultimo termine, vi sarà dunque un suo termine α_i che renderà soddisfatta l'equazione:

$$\alpha_i = \beta.$$

Allora avrà termine l' apparente contrazione del liquido, poichè i termini che seguono α_i, cioè α_{i+1}, α_{i+2}, ecc. sono tutti minori di β, e quindi l'acqua dovrà risalire nel cannello. Laonde dovrà esservi massima contrazione apparente prima che il liquido abbia realmente preso il suo minimo volume che corrisponde ad $\alpha_n = 0$; e ciò dovrà aver luogo ad una temperatura tanto meno lontana da 100° per quanto β sarà più grande. La qual cosa spiega i risultamenti ottenuti da Dalton sperimentando con tubi di flint, ferro, rame, ottone e stagno, i cui coefficienti di dilatazione sono nello stesso ordine crescenti; egli trovò che la massima contrazione dell'acqua vi si osservava alle rispettive temperature di 4°,222; 4°,667; 6°,222; 6°,664; 7°,778.

La ricerca della vera temperatura corrispondente alla massima densità dell'acqua, acquistò una grave importanza, quando gli autori del sistema metrico francese la tolsero a base della nuova unità di peso. A dir vero non sappiamo comprendere come quei dotti avessero potuto far dipendere la definizione del gramma da una condizione che giammai potrà esser determinata per esperimento diretto, stante che ogni grandezza, la quale si trova in uno stato prossimo a valore massimo o minimo, deve necessariamente presentare delle variazioni presso

che nulle. Quindi il metodo di Lefèvre-Gineau, che servì alla determinazione del chilogramma-tipo, e quelli di Tralles, Hope e Rumford, che furono altrettante determinazioni dirette della richiesta temperatura, non diedero risultati da produrre un pieno convincimento.

Il Lefèvre-Gineau pesava un esatto cilindro di rame, costruito da Fortin, in una massa di acqua che lentamente passava da 0° ad un certo grado superiore di temperatura. La perdita di peso che il cilindro ne soffriva, e che in appresso vedremo dover sempre pareggiare il peso del volume liquido rimosso, diveniva variabile pel continuo cangiare della densità del liquido e del volume del corpo immerso; e bastava conoscere (ciò ch'era fisicamente impossibile) la temperatura dell'acqua nell'istante in cui la perdita di peso appariva massima, per avere il grado di calore corrispondente alla maggior densità del liquido. Lefèvre-Gineau la trovò così eguale a 4°,4 centesimali.

Tralles, poi Hope e più tardi Rumford partirono nelle loro ricerche dal principio che nell'equilibrio di più liquidi sovrapposti il più leggiero debba galleggiare sul più pesante. L'apparecchio di Hope consisteva in un vase cilindrico di vetro A (Fig. 76), in cui erano introdotti orizzontalmente due termometri B e C. Il cilindro pieno di acqua a 0° veniva situato in una stanza a più alta temperatura, ed ivi si osservava l'andamento dei due termometri. Primo ad indicare un aumento di temperatura fu il termometro inferiore, e ciò indicava che l'acqua riscaldandosi oltre 0° diveniva più densa. E quando quel termometro pervenne a 3°,33, allora cominciò il movimento dell'altro che giunse a 3°,35. Era quello prossimamente l'istante in cui l'acqua acquistava la sua massima densità, poichè d'allora in poi il termometro superiore corse più rapidamente dell'inferiore. Variando in diversi modi questo sperimento Hope ne dedusse che la temperatura corrispondente alla massima densità dell'acqua dovesse stare tra 3°,33 e 3°,88.

La prima soluzione indiretta di questo problema, ch'è l'unica possibile, si ebbe per opera di Hallström. Mercè 64 pesate

di una palla vota di vetro che pescava in una massa di acqua, di cui si faceva variare la temperatura, egli trovava che tra il suo grado t di calore e la corrispondente densità D_t esiste la relazione empirica:

$$D_t = 1 + 0{,}000052939t - 0{,}0000065322t^2 + 0{,}00000001445t^3,$$

dalla quale colle note regòle del Calcolo superiore si deduce che il massimo valore di D_t corrisponde a $t = 4^{\circ},1$; risultamento identico a quello che nello stesso modo si avrebbe dalla 1ª delle formole di Kopp, date nel n.° precedente, quando ci facessimo a cercare il valore minimo di V°_{ar}.

Più tardi Despretz, rappresentando con una curva, definita per punti, la variazione del volume dell'acqua chiusa in tubi da termometro e corretta degli effetti della dilatazione del vetro, ottenne $t = 3^{\circ},997$. Dimodochè si può ritenere come temperatura della massima densità dell'acqua quella di 4° sopra 0°.

85. Col metodo di Muschenbroeck le dilatazioni lineari dei solidi erano state accuratamente misurate da Lavoisier e Laplace; Deluc aveva fatto sulle dilatazioni apparenti dei liquidi delle osservazioni importanti per la teoria del termometro; ed intanto la dilatazione dei corpi aeriformi, che aveva dato il primo termometro e che doveva riuscire di più facile misura perchè più grande, era tuttavia soggetto di controversia tra i fisici, sì per la quantità che per la legge. Deluc e Lambert la volevano uniforme, mentre Roy, Luz, Guyton-Morveau la pretendevano varia. Dilatazione dei corpi aeriformi.

Mal soddisfatto delle ricerche fin'allora eseguite, Volta ne intraprese delle nuove; e persuaso che il termometro ad aria fosse invenzione dell'olandese Drebel, nominò il suo apparecchio *termometro drebelliano*. Era questo un tubo lungo circa 15 pollici, di 2 a 3 linee di diametro e diviso in parti di eguali capacità mercè lo scorrere di una piccola colonna di mercurio. Ad un' estremità del tubo v' era soffiata una pallina piuttosto grande, che fino alla 1ª divisione si riempiva d' aria perfettamente secca, mentre il resto del tubo conteneva olio ovvero mercurio purgato di umidità per mezzo dell'ebollizione. Il tubo

9

così preparato era immerso coll' orifizio in giù in un cilindro di vetro (fig. 77) di tale profondità che versandovi dell' acqua ne restava coverta anche la pallina. Facendo variare la temperatura del bagno tra 0° e 80° Réaumur, sia immergendovi dei pezzi di ghiaccio, sia estraendone dell'acqua con un piccolo sifone per sostituirvi dell'altra calda, egli osservava l' aumento di volume che prendeva la massa di aria sottoposta all' esperimento, e non prendeva nota dei volumi osservati, se non quando ritornavano identici sotto lo stesso grado di temperatura, che una volta riproduceva per aumento di calore ed un'altra per diminuzione. Nella memoria [1] da cui togliamo i particolari di queste sperienze, nulla si dice della correzione dei volumi rispetto alla dilatazione del vetro; nè sembra verisimile che Volta l'avesse eseguita, essendo ch'erano scopo alle sue ricerche sì la comparabilità del termometro ad aria con quello a mercurio, che la cagione della grande divergenza dei risultamenti ottenuti dai fisici che lo avevano preceduto. Vi è detto però che i volumi osservati furono corretti della parte dovuta alla diversa pressione a cui erano sottoposti; e che fatta questa correzione talvolta di 20 in 20 gradi, tal'altra di 10 in 10 ed anche di 2 in 2, si ebbe che l'aria da 0° al grado dell'acqua bollente si dilata di 0,37 del suo volume a 0°; risultamento conforme a quello già ottenuto da Lambert.

Ma di ben altra importanza furono i risultamenti a cui Volta pervenne, quando si fece ad indagare la cagione che aveva potuto rendere sì discordanti i valori ottenuti dai suoi predecessori. Variando le sue ricerche con quella fecondità di spedienti, che è propria del genio, egli trovò: — 1° Che le differenze nei valori di dilatazione ottenuti dai diversi fisici, dipendevano dall'umidità annidata tra le particelle dell' aria o aderente alla faccia interna del tubo. — 2° Che fino a tanto che siavi umidità non ancora svolta in vapore elastico, la dilatazione dell'aria sarà crescente; ma che essa diviene uniforme dal momento che la produzione del vapore è compiuta: la qual cosa

[1] *Memoria sull'uniforme dilatazione dell'aria* — Collezione delle Opere del Cav. Conte Al. Volta — Tom. III, pag. 327.

dimostrava la dilatazione del vapore essere uniforme come quella dell'aria. — 3° Che se, in vece di olio o mercurio il tubo si riempiva di acqua, nel qual caso l'aria sovrastava ad una sorgente continua di vapore, allora la sua dilatazione, e quindi la sua elasticità, riusciva crescente in tutta l'estensione della scala termometrica. E questo risultamento, il quale mostrava la produzione del vapore esser crescente colla temperatura, era un fatto di sommo interesse in un tempo in cui la vera teoria dell'evaporazione appena cominciava a stabilirsi.

Volta faceva queste importanti scoverte nel 1792. Nel 1801 Gay-Lussac e Dalton pervennero nel tempo stesso ai medesimi risultamenti che Volta aveva ottenuti, meno la piccola differenza dovuta alla dilatazione del vetro, di cui ebbero conto. Essi estesero le loro ricerche a gas diversi dall'aria, e per tutti trovarono tra 0° e 100° la stessa dilatazione 0,375 del volume a 0°. Identico risultamento poi ebbero Dulong e Petit dalle loro sperienze estese da —36° a +360° del termometro centigrado.

Dietro tutte queste ricerche pareva che la scienza dovesse ricevere come un fatto incontrastabile che tutti i gas si dilatassero uniformemente e che per tutti il coefficiente di dilatazione fosse di 0,00375 del loro volume a 0°.

Intanto Rudberg concepiva qualche dubbio sul valore di questo coefficiente, già da tutti ricevuto come certo; e fattosi a verificarlo con due metodi diversi, otteneva come valore medio della dilatazione dell'aria tra 0° e 100° il numero 0,36457.

Più tardi Magnus e Regnault eseguirono contemporaneamente analoghe ricerche, dalle quali si ebbe:

— 1° Che la quantità di dilatazione dell'aria tra 0° e 100° è di 0,3665 del volume a 0°, e che questa dilatazione varia colla pressione a cui l'aria è sottoposta: Regnault ha trovato che facendo variare la pressione da 110^{mm} a 3665^{mm} la dilatazione dell'aria si accresce da 0,3648 a 0,3709.

— 2° Che la dilatazione è diversa pei gas differenti dall'aria; così pel gas idrogeno si è trovata la dilatazione 0,36613 e 0,39028 per l'acido solforoso.

— 3° Che pei gas che possono liquefarsi la dilatazione è maggiore che per l'aria, e tanto più grande quanto sono più facili ad esser liquefatti.

Applicazioni dei coefficienti di dilatazione.

86. — 1ª *Equivalente meccanico della ripulsione termica.* Se la trazione rende la forza di coesione comparabile a forza meccanica, ad un simile termine di comparazione potremo ancora riferire la ripulsione molecolare operata dal calore. Prendendo ad esempio il ferro, facciamoci a determinare la forza di trazione a cui corrisponderebbe l'allungamento prodotto da un dato aumento di temperatura in una verga di questo metallo sotto date dimensioni. Per fissare le idee poniamo che la verga avesse 10 metri di lunghezza, 15 centimetri quadrati di sezione, e fosse riscaldata da 0° a 300°. Essendo 0,00001468 il coefficiente della dilatazione lineare del ferro tra 0° e 300° (pag. 121), l'aumento di lunghezza λ avvenuto nella verga, sarà dato dall'equazione:

$$\lambda = 10^{m} \times 300 \times 0{,}00001468 = 0^{m}{,}04404\,,$$

vale a dire che sarà di circa 44 millimetri. Or nella formola:

$$d = \frac{k}{e} \cdot \frac{l}{s}$$

data nel n° 68, ponendo $d=44$, $l=10$, $s=1500$ ed $e=20^{chi.}$ ch'è il coefficiente di elasticità del ferro, avremo:

$$k = 132000 \text{ chilogrammi},$$

che nella nostra ipotesi rappresenta il peso equivalente all'azione termica.

E poichè il peso necessario ad allungare un corpo di una certa quantità, è eguale a quello che premendolo lo accorcerebbe di altrettanto, ne segue che la verga passando da 300° a 0° svolgerebbe una forza traente pari ancora a 132000 chilogrammi. Di questa prodigiosa potenza, scoverta dalla Meccanica molecolare, l'arte ha saputo trarre non lieve vantaggio. Due mura laterali di una galleria del Conservatorio di Arti e Mestieri a Parigi si erano inclinate sotto il peso del solajo che

sostenevano. A fin di restituirle alla verticale l'Ingegniere sig. Molard le fece traversare da più verghe di ferro, terminate esteriormente da viti, le cui madreviti poggiavano a larghi scudi di ferro fuso che abbracciavano gran parte della faccia esterna delle mura. Metà del numero delle verghe furono riscaldate per mezzo di lucerne ad esse sospese, ed in tal ordine che le verghe fredde si trovassero alternate colle calde. Queste che per l'allungamento prodottovi dal calore concedevano che le madreviti vieppiù si stringessero, riducevano alquanto l'obbliquità delle mura, quando pel raffreddamento si contraevano. E con una simile operazione più volte ripetuta si ebbero le mura perfettamente raddrizzate.

— 2ª *Pendolo compensatore*. Abbiamo veduto nel nº 50 che la lunghezza del pendolo semplice, sincrono ad un dato pendolo composto, è funzione della distanza del centro di gravità di questo dall'asse di sospensione ; e poichè il luogo del centro di gravità di un corpo è funzione, in generale, delle sue dimensioni, ne avviene che variando la temperatura del corpo e quindi le sue dimensioni, sarà vària ancora la distanza del centro di gravità del corpo dall'asse di sospensione, e con essa la lunghezza del pendolo semplice che lo pareggia in celerità di moto.

Or la temperatura dell'atmosfera essendo in generale diversa da un istante all'altro, necessariamente le dimensioni di ogni corpo terrestre, e quindi la lunghezza ridotta di ogni pendolo, dovranno soffrire continue oscillazioni. In conseguenza l'andare costante di questo regolatore di ogni cronometro sarebbe un impossibile fisico, se la scienza non avesse trovato nel *pendolo compensatore* il modo di far servire alla correzione dell'errore la cagione stessa che lo produce.

Un modo di compensazione assai comodo è quello dovuto al celebre orologiaro inglese Graham. Consiste questo modo nel sostituire, come indica la fig. 67, all'ordinaria lente del pendolo un vaso cilindrico di vetro in gran parte pieno di mercurio. Così mentre il centro di gravità del pendolo discende per effetto dell'allungamento della verga, sale viceversa per la di-

latazione del mercurio; basterà dunque che questi due opposti movimenti risultino eguali, perchè la distanza del centro di gravità dall'asse di sospensione resti invariabile. Per una prima approssimazione si pone, ciò che non si allontana gran fatto dal vero, che il centro di gravità del pendolo si confonda con quello del cilindro di mercurio; ed in questa ipotesi dinotando con l la distanza del punto di sospensione dalla base inferiore del mercurio, con l' l'altezza di questo liquido, e con α ed α' i coefficienti della dilatazione lineare del ferro e della dilatazione apparente del mercurio, avremo che il centro di gravità mentre discende, per la variazione di 1° di temperatura, della quantità $l\alpha$ per l'allungamento del ferro, sale poi di $\frac{1}{2}l'\alpha'$ per l'allungamento del cilindro di mercurio; quindi:

$$l' : l = 2\alpha : \alpha'.$$

Dietro questa prima determinazione della ragione di l' ad l, si perverrà ad una soddisfacente compensazione facendo variare gradatamente la quantità del mercurio.

Avvi ancora dei pendoli compensatori interamente solidi. Rappresenti *abcd* (Fig. 69) un telaio rettangolare di bacchette di ferro, sospeso mediante l'asta *op* dello stesso metallo. Sulla base *bd* del rettangolo si elevano due colonnette di ottone *fh*, *gt* congiunte dalla traversa *fg* che per mezzo dell'asta di ferro *nm* porta sospesa la lente *m* del pendolo. Cominciando dal supporre che il centro di gravità del sistema si trovi in quello della lente, la sua distanza L dal punto di sospensione *o*, sarà dato (facendo $op = a$, $ab = b$, $nm = c$, $fh = l$) dell'equazione:

$$L = a + b + c - l,$$

donde: $$a + b + c = L + l.$$

Or ponendo che la temperatura varii di 1°, il sistema delle bacchette di ferro discenderà di $(a+b+c)\,\alpha$, e quello delle colonnette di ottone salirà di $l\alpha'$, α ed α' indicando i coefficienti della dilatazione lineare del ferro e dell'ottone. Quindi la distanza del centro di gravità della lente dal punto o di sospensione rimarrà costante, quando si abbia:

$$(a+b+c)\alpha = l\alpha',$$

ossia:
$$(L+l)\alpha = l\alpha';$$

donde:
$$l = \frac{L\alpha}{\alpha'-\alpha} = \frac{L}{\frac{\alpha'}{\alpha}-1} = \tfrac{3}{2}L,$$

essendo prossimamente $\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{5}{3}$.

Comparando questo risultamento all'indispensabile condizione di $l < L$, si vede la costruzione del pendolo essere impossibile sotto l'indicata forma. Ma se poi aggiungasi (Fig. 68) un nuovo telaio di ferro, *svre*, e quindi le due bacchette di ottone *uq*,*xy*, ciascuna della lunghezza l', si avrà l'equazione:

$$l+l' = \tfrac{3}{2}L,$$

la quale potrà esser soddisfatta colla condizione di l ed l' ciascuna minore di L.

A solo fine di chiarire la composizione dell'apparecchio, abbiamo supposto le diverse bacchette separate l'una dall'altra; ma in realtà esse stanno a quasi contatto come si vede nella Fig. 75.

I cangiamenti di temperatura perturbano ancora il buon andamento degli oriuoli a molla. È noto come il loro movimento sia regolato per mezzo di un bilanciere che spinto a rotazione continua, prende invece moto di oscillazione per effetto di una piccola spirale elastica. Intanto la formola data a pag. 67:

$$\theta = \frac{Fa}{\Sigma\mu r^2}$$

ci fa vedere che per una medesima azione impressa Fa, la celerità angolare θ debba crescere o decrescere quando il momento d'inerzia $\Sigma\mu r^2$ diverrà viceversa più o meno piccolo. Or il valore di $\Sigma\mu r^2$ segue una certa ragion diretta del grado di calore, imperocchè variando la temperatura, nello stesso senso variano le distanze delle molecole del bilanciere dall'asse di

rotazione ; quindi avviene che l'oriuolo cammina più lento quando la temperatura si eleva, e va più celere quando essa discende.

Per ottenere l'uniformità di moto in questa specie di oriuoli i fratelli Breguet hanno sostituito alla circonferenza del bilanciere alcune lamine compensatrici *ab*, ossia delle lamine composte di due metalli differenti, le quali aumentando o diminuendo di curvatura secondo il diverso grado di calore, si trovano più vicine all'asse quando il bilanciere si dilata, e più lontane quando esso si restringe; ed affinchè queste contrarie alterazioni del valore di $\Sigma\mu r^2$ siano per riuscire perfettamente eguali, vi sono aggiunte le palline *m* come mezzi di correzione.

— 3ª *Pirometro ad aria.* L'azione termica, come quella di ogni altra forza, non può esser misurata che dai suoi effetti; e tra questi la dilatazione, perchè riducibile a misura di quantità lineari, è stata prescelta a darne una valutazione numerica. Ma nella dilatazione vi è contrasto tra l'energia termica e quella dell'attrazione molecolare ; questa dunque dovrebbe esser costante per qualunque intervallo tra le molecole, affinchè dalla quantità della dilatazione prodotta potessimo arguire il valore della cagione produttrice, come dalla quantità di massa che ha percorsa l'unità di lunghezza nell'unità di tempo noi deduciamo il valore di una forza meccanica. Or ci è noto che l'attrazione molecolare decresce rapidamente, quando la distanza tra le molecole si aumenta; e perciò non avvi corpo solido o liquido che nella quantità della sua dilatazione possa offrire un metodo razionale di misura della forza calorifera. I soli corpi aeriformi, come quelli che posseggono un'indefinita espansibilità, possono esser ricevuti come mezzi termometrici, quando siano sottoposti a pressione costante. Quindi l'uso del termometro ad aria ogni volta che si ha bisogno di misure precise, od anche del termometro a mercurio ma pel solo intervallo da 0° a 100°, poichè tra questi limiti le sue indicazioni sono conformi a quelle del termometro ad aria.

A questo pregio il termometro ad aria aggiunge l'altro di

una scala illimitata. Il mercurio, che si solidifica a —40° e bolle a +360°, fissa due limiti oltre i quali è necessariamente fuor di uso come corpo termometrico; ed altrettanto dovrà dirsi dello spirito di vino che a —110° si addensa come l'olio congelato e bolle a +79°. Ma l'aria si può riscaldare o raffreddare a quel grado che si vuole, senza che lasci di esser simile a se stessa ; e perciò il Pouillet si è servito di un termometro di questa specie, da lui denominato *pirometro ad aria*, per valutare alcune temperature assai elevate.

Per formarsi un'idea del suo pirometro, s'immagini un serbatoio *a* (Fig. 93) di platino, messo in comunicazione con un sottile tubo *bc*, in parte anche di platino e nel resto di argento: a questo va congiunto un tubo *ts* di cristallo di uniforme diametro interiore, comunicante col robinetto *z*, e diviso nel braccio *t* in parti di eguale capacità. Quella del serbatoio, del tubo *bc* e del braccio graduato del tubo *ts* si determineranno col metodo (n° 81) di pesar l'apparecchio prima voto e poi pieno di mercurio o di acqua. Ciò fatto, si empirà l'apparecchio, fino ad un certo segno del tubo *t*, di aria secca, ed il resto di mercurio ; e si avrà cura che questo liquido sia ad uno stesso livello nelle due braccia del tubo , quando l'apparecchio sarà ridotto alla temperatura 0°. Allora si prenderà nota del volume dell'aria, e poi si esporrà il serbatoio all'azione della sorgente calorifera di cui si vuol conoscere il grado. A misura che l'aria andrà dilatandosi, il mercurio scenderà nel braccio *t* elevandosi nell'altro; ed a mano a mano che questo disquilibrio si produce, si cercherà ristabilirlo facendo scorrere del mercurio pel robinetto *z*. Il serbatoio avrà presa la temperatura della sorgente, quando il mercurio cesserà di muoversi ; ed allora si farà una seconda determinazione del volume dell'aria. Siano v il volume dell'aria a 0°, Δ la quantità della dilatazione prodotta, t la temperatura , α il coefficiente di dilatazione dell'aria, e β quello del platino; sarà

$$\Delta = v(\alpha - \beta)t,$$

donde :

$$t = \frac{\Delta}{v(\alpha - \beta)}.$$

Col suo pirometro Pouillet ha determinato le temperature, a cui si fondono il ferro, l'oro, l'argento, ecc., ed ha trovato le seguenti relazioni tra il colore del platino ed il grado della sua temperatura.

Colori del platino	*Temperature.*
Rosso nascente.	523
Rosso oscuro .	700
Ciliegia nascente	800
Ciliegia .	900
Ciliegia chiaro	1000
Arancio cupo .	1100
Arancio chiaro.	1200
Bianco .	1300
Bianco sudante	1400
Bianco abbagliante .	1500

E giova osservare che la temperatura 523°, che Pouillet assegna al rosso nascente, ossia al grado di calore che rende visibile in uno spazio privo di luce un corpo non fosforescente, deve riguardarsi (attesa la non identità della forza visiva dei diversi individui) come eguale all'altra di 526° trovata dal prof. Draper per tutt'altra via.

CAPO QUINTO.

CALORE SPECIFICO.

87. La temperatura di un corpo non è propriamente che la temperatura delle sue molecole; e perciò la quantità di calore posseduta da un corpo sotto un certo grado termometrico dovrà essere proporzionale al numero delle sue molecole, ossia alla massa del corpo. È noto d'altronde (nº 86—3ª) che per una data massa l'energia termica debba assumersi proporzionale al grado di temperatura indicato dal termometro ad aria; quindi se poniamo =1 il calore posseduto dall'unità di massa alla temperatura di 1°, quello posseduto dalla massa m alla temperatura t dovrà essere espresso da mt. Definizione del calore specifico.

Premesso ciò, facciamoci a determinare qual sarà la temperatura che avrà la miscela di due masse di acqua, m ed m' che avevano rispettivamente le temperature t e t'. Supponendo che nell'atto della mescolanza non siavi calore perduto o acquistato, la massa risultante dovrà possedere la quantità di calore $mt+m't'$; la quale dovendo pareggiare il prodotto della somma $m+m'$ delle masse per l'ignota temperatura x della miscela, si ha l'equazione:

$$(m+m')x = mt+m't',$$

donde:

$$x=\frac{mt+m't'}{m+m'}.$$

Finchè questa formola si applicherà a miscele di corpi omogenei, darà risultamenti conformi al fatto; ma l'accordo cesserà di aver luogo, quando la mescolanza sarà di corpi eterogenei. Poniamo, a modo di esempio, che un chilogramma di ferro alla temperatura di 11° sia immerso in un chilogramma di acqua 0°. Avremo in questo caso $m=m'=1$, $t=11°$, $t'=0$;

quindi la formola ci darebbe x=5°,5; mentre dal fatto risulta x=1°. Vale a dire che la quantità di calore emessa dal ferro nello scendere da 11° ad 1° di temperatura non ha fatto che innalzare di un solo grado la temperatura dell'acqua; e perciò quando questo corpo avrà uno stesso grado termometrico che un'egual massa di ferro, possederà realmente una quantità di calore 10 volte maggiore.

Da ciò si rileva che per esprimere la quantità di calore posseduta da un corpo, fa d'uopo che al prodotto della massa per la temperatura si aggiunga come fattore la speciale dose di calore necessaria ad elevare di 1° di temperatura l'unità di massa del corpo. Questa speciale quantità termica, che varia colla natura del corpo e che si è ricevuta tra le sue qualità distintive, è denominata *calore specifico*.

Quando il calore si riguardava come un fluido agente per quantità di massa, e che perciò s'immaginava annidato tra le molecole di un corpo, come l'acqua nei pori di una spugna, si doveva necessariamente considerare come più capace a contener calore quel corpo che a parità di massa e temperatura ne richiedeva una dose maggiore. Quindi si è denominata *capacità termica* la cagione produttrice del calore specifico; e questo nome, la cui ragione più non è ammissibile nella scienza, è tuttavia ricevuto come sinonimo di *calore specifico*.

Misura del calore specifico.

88. La misura del calore specifico di un corpo, come quella di ogni altra grandezza, richiedeva la scelta di un'unità; e come tale si è tolta la quantità di calore necessaria ad elevare da 0° a 1° l'unità di massa dell'acqua. Questa quantità di calore è oggi denominata *caloria*; e quindi la determinazione del calore specifico di un corpo consiste in definire il numero delle calorie che bisognano per elevare di 1° di temperatura ogni unità della sua massa. Varii metodi si sono all'uopo escogitati, e che ora andiamo ad esporre brevemente.

Metodo delle mescolanze.

89. Questo metodo, con cui Black scovriva nel 1757 il fatto del calore specifico, consiste nello immergere il corpo da sperimentare, già riscaldato, in un bagno di acqua, e dalla quantità di calore che questo liquido ne acquista, dedurre la capacità termica del corpo.

Per attuare questo metodo si prenderà un vase cilindrico di sottile foglia di rame; si peserà esattamente del pari che l'acqua, di cui si farà presso che pieno, e se ne determinerà la temperatura: in questo bagno s'immergerà il corpo da sperimentare, già riscaldato ad un certo grado e definito in peso, e si prenderà nota della temperatura a cui salirà la mescolanza. Sieno:

P il peso dell'acqua,
p quello del cilindro,
π quello del corpo;
θ la sua temperatura
t la temp. iniziale dell'acqua
t' quella della mescolanza.

Chiamando C la capacità termica del corpo, sarà $C\pi(\theta-t')$ la quantità di calore ceduta al bagno; e di questa quantità l'acqua avrà presa la porzione $P(t'-t)$, essendo la sua capacità $=1$, ed il cilindro la porzione $C'p(t'-t)$, indicando C' la sua capacità termica. Or se tutto il calore perduto dal corpo caldo, si è acquistato dall'acqua e dal cilindro, reggerà l'equazione:

$$C\pi(\theta-t')=(P+C'p)(t'-t).$$

La quale, contenendo le due incognite C e C', ci dimostra che a rendere il metodo delle mescolanze sufficiente a se stesso fa d'uopo cominciare dal definire la capacità termica della sostanza del cilindro, vale a dire che il primo corpo da porre a cimento debba essere una lamina di rame.

Si è supposto che la temperatura t' del bagno adequi l'azione del calore perduto dal corpo immerso. Ciò non è possibile, stante la perdita di calore che avviene per la superficie di livello dell'acqua e per quella del recipiente, mentre l'apparecchio si riscalda; quindi il bagno tocca un massimo di temperatura, quando il calore che perde, eguaglia quello che riceve dal corpo caldo. Questo massimo è appunto il valore sperimentale di t', e che sarebbe stato più grande senza la perdita suindicata. Il valore di t' è dunque da correggersi; e perchè l'errore fosse minimo possibile si ha cura — 1° Che la super-

ficie totale del bagno sia più piccola che si può ; e ciò si ottiene dando al cilindro un'altezza eguale al diametro della sua base [1] — 2° Che la temperatura del bagno sia di 2 a 3 gradi sotto quella del mezzo ambiente, e che il corpo da immergersi abbia tale massa e temperatura da far salire il grado termometrico della miscela presso che di altrettanto su quello dello stesso mezzo. Questo spediente , ideato da Rumford come modo di compensazione, ha poi somministrato a Regnault il dato necessario per calcolare la vera correzione da farsi al valore sperimentale di t'.

Una nuova difficoltà s'incontra nella giusta valutazione di θ. Imperocchè questo grado di riscaldamento non sarà ben definito, se il corpo non si conservi per qualche tempo in un bagno o stufa di nota temperatura ; e poi (ciò che sarà sommamente difficile) bisognerà trasportarlo nel bagno del esperimento senza che nel tragitto perda sensibilmente del calore acquistato. Ed aggiungasi inoltre che ove il riscaldamento del corpo si ottenga, come fecero Dulong e Petit, per immersione in un bagno caldo, si dovrà tener conto ancora del velo liquido che rimane aderente al corpo. La qual cosa forse è stata cagione di far riuscire le capacità termiche, determinate dai summentovati fisici , più piccole in generale di quelle posteriormente ottenute da Regnault , che il primo ha saputo conservare il valore iniziale di θ.

L'apparecchio adoperato da Regnault nel suo grande lavoro sulle capacità termiche, è rappresentato dalla fig. 81. Il corpo da sperimentarsi dopo averlo ridottò in frantumi va situato in un piccolo paniere *e*, formato di fili metallici , e nel cui mezzo sta il termometro *d*. Il paniere pende nel cilindro *c*; questo è circondato dal cilindro *b*, e *b* da *a* ; dimodochè si ha un recipiente a triplo inviluppo. Lo spazio compreso tra *a* e *b* è occupato da bambagia ed aria ; nella cavità media *b* circola il vapore che pel tubo *y* viene dalla caldaia *x* mantenuta in continua ebollizione, e che poi pel tubo *y'* passa nel serpenti-

[1] Il Calcolo dimostra che un cilindro di dato volume avrà minima superficie, quando sarà soddisfatta la condizione enunciata nel testo.

no x'. Il vapore riscalda lo spazio *e*, ed il termometro *d* che sale lentamente, diviene in fine stazionario, ed allora indica la temperatura finale del corpo da cui è circondato. Allora si spinge sotto la stufa, formata dai tre cilindri *a,b,c*, il vase destinato alla mescolanza, la cui temperatura iniziale è data dal termometro *f* che vi è immerso, mentre quella dell'aria ambiente è data dal termometro *h*; e mediante apposito congegno si apre il fondo della stufa, si libera il filo di sospensione del paniere, e così questo cade nel vase di mescolanza, protetto nel suo breve cammino da ogni azione termica del mezzo ambiente. Caduto il paniere nel vase, questo è riportato nella prima posizione; vi si agita prontamente l'acqua, e col catetometro si determina la massima altezza a cui si eleva il termometro immerso.

L'influenza che sul valore di t' possono avere il paniere, il termometro ed il vase di mescolanza, è stata esattamente calcolata da Regnault. Dal suo esteso lavoro togliamo la seguente tavola:

SOSTANZE	CAPACITA'	SOSTANZE	CAPACITA'
Acqua. . . .	1,00000	Cobalto . . .	0,10696
Ferro	0,11370	Platino . . .	0,03243
Zinco	0,09555	Palladio . . .	0,05927
Rame. . . .	0,09515	Oro.	0,03244
Cadmio . . .	0,05669	Solfo	0,20259
Argento . . .	0,05701	Selenio . . .	0,08370
Arsenico . . .	0,08140	Tellurio . . .	0,05155
Piombo . . .	0,03141	Iodo	0,05412
Bismuto . . .	0,03084	Mercurio . . .	0,03332
Antimonio . .	0,05077	Ottone. . . .	0,09391
Stagno. . . .	0,05623	Vetro	0,19768
Nickel. . . .	0,10863	Essen. di tereb.	0,42593

90. Il metodo delle mescolanze, prima che avesse ricevuto i perfezionamenti che vi recarono Dulong e Petit e poi Regnault, lasciava tale incertezza sul valore di t', che se valeva a mostrare il fatto del calore specifico, non poteva somministrarne l'espressione numerica. Perciò Lavoisier e Laplace si

Metodo del calorimetro.

fecero ad escogitare un nuovo metodo, ed all'uopo idearono il *calorimetro.* Questo apparecchio (Fig. 82) componesi di tre cavità concentriche : la cavità centrale, formata da una rete metallica, è destinata a ricevere il corpo caldo, mentre le altre due son piene di ghiaccio pesto, e per due condotti distinti possono scaricarsi dell'acqua provveniente dalla fusione del ghiaccio. L'uso a cui è destinata la cavità esterna è quello di preservare il ghiaccio della cavità media dall'azione termica dello spazio ambiente, cosicchè l'acqua che ne fluisce è un prodotto della sola azione del corpo caldo.

Or immaginiamo già completa l'azione dell'apparecchio, vale a dire che il corpo, intrôdottovi quando la cavità media e l'esterna erano già piene di ghiaccio, vi sia restato il tempo sufficiente (10 a 15 ore) per prendere in tutta la sua massa la temperatura 0°, e che in tutto quel tempo siasi provveduto a mantenere costantemente piena di ghiaccio la cavità esterna. Allora aperto il condotto della cavità media, poniamo che sia p il peso dell'acqua che n'è fluita, e sia ancora π il peso del corpo introdotto nel calorimetro e t la temperatura con cui vi è entrato: è chiaro che l'unità di peso del corpo alla temperatura di 1° avrebbe fusa la quantità di ghiaccio $\frac{p}{\pi t}$; e similmente si avrà l'analoga espressione $\frac{p'}{\pi' t'}$ per un altro corpo di peso π' e che entrato nel calorimetro col grado di temperatura t' abbia fuso la quantità di ghiaccio p'. Or i due valori $\frac{p}{\pi t}$ e $\frac{p'}{\pi' t'}$ sono evidentemente nella ragione delle capacità termiche dei due corpi, e perciò basterà prendere uno di questi valori come unità per ottenere in numero la capacità termica dell'altro corpo.

Pel calorimetro dunque è unità di misura la quantità di ghiaccio fuso dall'unità di peso del corpo scelto a termine di comparazione e che avesse la temperatura di 1°. Per dedurne poi l'equivalente numero di calorie, bisognava determinare quante ne richiedesse la fusione dell'unità di peso del ghiaccio a 0°,

Lavoisier e Laplace trovarono che questo numero era di 75 calorie, e quindi moltiplicando per 75 (numero che vedremo esser minore del vero) i risultamenti ottenuti col calorimetro, ebbero le capacità termiche de'corpi rispetto a quella dell'acqua come unità.

Intanto gl'inventori del calorimetro non si avvidero che il loro metodo non era preferibile a quello delle mescolanze con tutti i difetti che questo allora aveva. Ponendo di lato la difficoltà della determinazione di 0 che rimaneva intatta, restava tuttavia ad evitare e l'errore prodotto dalla temperatura della cavità media, e quello che derivava dall'acqua che seco portava il ghiaccio pesto al momento di esser introdotto in essa cavità. Per evitare queste cagioni di errore sarebbe stato necessario adoperare un secondo calorimetro pieno di ghiaccio nelle cavità media ed esterna, onde conoscere l'acqua prodotta dalla sola azione dell'apparecchio, e nel tempo stesso non eseguire gli sperimenti che d'inverno, quando la temperatura dell'aria era di 2 a 3 gradi superiore a 0°. Un ambiente a 0°, che a prima vista potremmo credere preferibile, avrebbe il grave inconveniente di congelare nell'origine del condotto l'acqua ottenuta nella cavità media.

Or se a queste osservazioni aggiungiamo quelle della lunga durata di ogni sperimento, e del necessario ingrandimento di ogni errore dietro la moltiplicazione del risultato sperimentale pel numero delle calorie, troveremo una ragione più che sufficiente dell'obblio in cui è caduto il metodo del calorimetro.

Metodo del raffreddamento.

91. Il metodo del raffreddamento, adoperato per la prima volta da Mayer, è stato poi perfezionato da Dulong e Petit. L'apparecchio di questi fisici è rappresentato nella fig. 83. AB è una cassa cilindrica di rame, interiormente coverta di nero fumo; in essa pende il vasetto cilindrico C di sottile lamina di argento, destinato a ricevere il corpo, su cui si vuole sperimentare, già ridotto in polvere, ed il bulbo di un termometro che deve indicarne la temperatura. La cassa AB, che per mezzo del tubo T può comunicare con una macchina pneumatica, è poi cir-

condata di ghiaccio pesto, che giace tra la sua faccia esterna e l'interna del cilindro KD che la involve.

A fin di riscaldare il vasetto C, dopo averlo riempito della polvere che si vuol sottoporre ad esperimento aggiustandola intorno al bulbo del termometro, lo si porrà in un recipiente metallico circondato d'acqua bollente, donde non sarà tolto prima che il termometro sia divenuto stazionario. Allora si ritornerà il vasetto nella cassa, che sarà rapidamente votata di aria; e dall'istante in cui il termometro sarà disceso a 10° si misurerà il tempo t che impiegherà per discendere fino a 5°. Chiamando m, m', m'' le masse della polvere, del cilindro di argento e della porzione di termometro in esso compresa; x, c e c' le rispettive capacità termiche, è chiaro che il vasetto avrà perduta nel tempo t una quantità di calore proporzionale a $mx+m'c+m''c'$. Per un altro corpo la cui massa sia n, y la sua capacità, e t' il numero di secondi trascorsi per la discesa del termometro da 10° a 5°, avremo similmente una perdita di calore proporzionale à $ny+m'c+m''c'$. E poichè durante tempi eguali e per eguali eccessi di temperatura il cilindro di argento deve perdere eguali quantità di calore, ne segue che i due suindicati trinomii dovranno essere proporzionali ai tempi t e t'; quindi per ottenere il rapporto di x ad y si avrà l'equazione:

$$\frac{mx+m'c+m''c'}{ny+m'c+m''c'}=\frac{t}{t'}.$$

L'intonico di nerofumo dato alla faccia interna della cassa AB, l'averla privata di aria, e l'aver atteso che il termometro fosse disceso a 10°; sono condizioni dettate dalle leggi del raffreddamento, scoverte dagli stessi Dulong e Petit e che in seguito esporremo. Ma oltre a queste condizioni avvene delle altre che il metodo suppone soddisfatte, e che intanto non sembrano ammisibili nello stato attuale della scienza. Ed in vero si è tacitamente supposto — 1° Che la polvere avesse il grado di calore del termometro che n'è circondato, mentre la

resistenza alla trasmissione del calore, propria dei corpi polverizzati, ci fa credere che debba esser diversa — 2° Che qualunque fosse la natura della polvere il calore dovesse incontrare eguale difficoltà nel passare dal termometro alla polvere e da questa all'argento del vasetto ; la qual cosa è inconciliabile coll'idea di una conducibilità varia a norma della natura dei corpi — 3° Che i risultamenti non avessero alcuna relazione col grado di compressione dato alla polvere, mentre Regnault sperimentando su quella di argento ha trovato, secondo il diverso grado di compressione, una capacità termica variabile tra 0,08535 e 0,05616. E ciò può far comprendere la ragione, per la quale le capacità termiche ottenute col metodo del raffreddamento da Dulong e Petit, siano risultate costantemente minori di quelle determinate da Regnault col metodo delle mescolanze.

92. Volendo determinare le capacità termiche dei liquidi col metodo del raffreddamento, basterà riempirne il vasetto di argento, e ripetere le stesse operazioni che pei solidi ridotti in polvere. Se poi si voglia seguire il metodo delle mescolanze, si chiuderanno in un cilindro metallico che possa soffrirne il contatto senza svolgimento di azione chimica, e si procederà all'esperimento dopo aver determinata la parte dovuta alla sola azione del cilindro. Capacità dei liquidi.

Si potrebbe determinare ancora la capacità termica di un liquido, immergendovi un solido riscaldato di nota capacità. Allora la formola, data a pag. 141 diverrebbe:

$$C\pi(\theta - t') = (Px + C'p)(t' - t),$$

dalla quale, essendo note le capacità termiche C e C′ del corpo immerso e del recipiente, dedurremmo quella del liquido indicata da x.

93. Le prime ricerche che abbiano dato risultati soddisfacenti sulle capacità termiche dei corpi aeriformi, sono state quelle di Delaroche e Bérard, premiate dall'Accademia francese nel 1812. Capacità dei gas, a pressione costante.

Essi costruirono un apparecchio assai ingegnoso, pel cui

mezzo era dato ad una certa quantità di gas di percorrere replicate volte sotto una pressione costante e con moto uniforme le spire di un serpentino accomodato in una cassa metallica piena di acqua. Prima ch'entrasse in questo calorimetro, il gas veniva riscaldato da una corrente di vapore che circuiva il tubo da cui era condotto; e due termometri situati l'uno al principio e l'altro alla fine del serpentino, facevano conoscere con quale temperatura il gas vi entrava e con qual altra ne usciva: eravi poi un terzo termometro che dava la temperatura del calorimetro.

Aspettando che questo avesse preso una temperatura fissa, si ebbe:

per l'aria atmosferica	15°,734
— l'idrogeno	14 ,214
— l'acido carbonico	19 ,800
— l'ossigeno	15 ,365
— l'ossido di azoto	21 ,246
— il gas oliofaciente	24 ,435
— l'ossido di carbonio	16 ,270

Or il calorimetro perveniva ad una temperatura fissa, quando il calore che trasmetteva nello spazio ambiente pareggiava quello che riceveva dal gas; e poichè queste quantità di calore erano cedute in tempi eguali da eguali volumi di gas, così erano ancora direttamente proporzionali alle loro capacità termiche. Laonde prendendo ad unità la capacità dell'aria, quella dell'idrogeno, per esempio si avrà dalla proporzione:

$$15,734 : 14,214 = 1 : x = 0,9033.$$

E similmente si procederebbe rispetto agli altri gas. Che se poi se ne volessero le capacità a pesi eguali, basterebbe dividere per le rispettive densità i numeri ottenuti col metodo precedente.

Ponendo in fine che la capacità dei gas si volessero comparare a quella dell'acqua come unità, allora chiamando m il peso del gas che in un minuto passa pel serpentino, c la sua capacità termica, t la temperatura con cui il gas esce dal calori-

metro quando questo ha preso una temperatura fissa, e θ quella con cui vi è entrato, avremo che il gas avrà ceduta al calorimetro in un minuto la quantità di calore $mc(\theta - t)$.

Daltronde chiamando M il peso dell'acqua, insieme a quelli del recipiente, del serpentino e del termometro ridotti a norma delle rispettive capacità, g un fattore costante determinato per mezzo di osservazioni sul raffreddamento del calorimetro in circostanze simili a quello dell'esperimento, sarà Mgt la quantità di calore emessa nel mezzo ambiente nel tempo, in cui si riceve dal gas la quantità termica $mc(\theta - t)$. Quindi l'equazione

$$mc(\theta - t) = Mgt,$$

da cui si avrà il valore di c rispetto all'acqua come unità.

Così Delaroche e Bérard ebbero i seguenti risultamenti:

NOMI DELLE SOSTANZE	CAPACITA' RISPETTO ALL'ARIA a volumi eguali	a masse eguali	CAPACITA' RISPETTO ALL' ACQUA
Aria atmosferica	1,0000	1,0000	0,2669
Idrogeno	0,9033	12,3401	3,2936
Ossigeno	0,9765	0,8848	0,2361
Azoto	1,0000	1,0318	0,2734
Ossido di carbonio	1,0340	1,0805	0,2884
Acido carbonico	1,2588	0,8280	0,2210
Ossido di azoto	1,3503	0,8878	0,2369
Gas oliofaciente	1,5530	1,5763	0,4207
Vapore di acqua	1,9600	3,1360	0,4870

94. È un dato sperimentale che la compressione aumenta la temperatura di un gas, e l'espansione la diminuisce. Quindi nelle sperienze di Delaroche e Bérard se i gas riscaldandosi non si fossero dilatati, avrebbero presa una temperatura più elevata assorbendo la stessa quantità di calore, ed avrebbero mostrato in conseguenza una minor capacità termica. Questa

Capacità dei gas a volume costante.

proprietà in un corpo aeriforme sarà dunque diversa, secondochè sarà costante la pressione o il volume.

Or poniamo che per mezzo di riscaldamento si accresca di t gradi la temperatura della massa m di un corpo aeriforme avente la capacità c sotto una pressione costante: sarà mct l'espressione della quantità di calore comunicata al corpo. E se questo dopo aver assorbito il calore mct si comprima finchè non torni al primo volume, vi sarà un nuovo accrescimento t' di temperatura; e la stessa quantità di calore comunicato sarà espressa da $mc'(t+t')$, c' indicando la capacità del gas a volume costante. Sarà dunque:

$$mct = mc'(t+t'),$$

donde:

$$\frac{c}{c'} = 1 + \frac{t'}{t}.$$

Ma il rapporto di $c:c'$ è costante, dovrà esserlo ancora quello di $t':t$, vale a dire che t' dovrà esser della forma ht, h indicando un fattore costante.

Rispetto all'aria atmosferica il valore di h può esser dedotto da alcuni sperimenti di Clément e Desormes. Questi presero un pallone A (Fig. 58 *bis*) di cristallo, e ne munirono il collo di una ghiera di ottone provveduta del robinetto c, ed alla quale congiunsero il tubo di cristallo a che con un estremo si apriva nel collo del pallone e coll'altro pescava in un vasellino pieno di acqua. Una vite scolpita sull' orifizio della ghiera serviva a far comunicare per mezzo di un tubo l'interno del pallone con una macchina pneumatica. Dopo avervi così aspirato alquanto di aria, si chiuse il robinetto c, si attese che il pallone si ponesse in equilibrio di temperatura col mezzo ambiente, e si prese nota dell'altezza a cui l'acqua per effetto dell'aspirazione era salita nel tubo a. Allora si riaprì il robinetto c perchè l'aria rientrasse, e si tornò a chiudere nell'istante in cui l'acqua scendeva nel tubo fino al livello esterno. Ma non vi si arrestò, poichè dopo qualche tempo si vide risalire fino ad una certa altezza, donde più non si mosse. Ciò

dimostrava che l' aria venuta di fuori aveva compressa quella rimasta nel pallone, ne aveva per conseguenza accresciuta la temperatura , e così la tensione dell'aria interna aveva pareggiata quella dell' esterna , senza che avesse la stessa densità. Quindi avvenne , che dissipato l' eccesso di temperatura nel mezzo circostante , la tensione interna risultava minore dell'esterna e l'acqua risaliva nel tubo *a*.

In uno degli esperimenti Clément e Desormes ebbero :

Temperatura ambiente	$12^{\circ},5$
Presssione atmosferica durante l'esperimento . .	$766^{mm},5$
Altezza dell' acqua nel tubo dopo l' aspirazione , ridotta in altezza di mercurio	$13^{mm},01$
Altezza dell'acqua dopo rientrata l'aria ed equilibrata la temperatura del pallone, ridotta ancora in altezza di mercurio	$3^{mm},61$

Per dedurre da questi dati la quantità di calore svolta dall'aria residua nel pallone, chiamiamo h la pressione esterna , h_1 la pressione interna dopo rientrata l'aria ed equilibrata la sua temperatura, 1 volume dell'aria a 0°, α il suo coefficiente di dilatazione, x la temperatura a cui si è elevata per la sofferta compressione , e t la sua temperatura finale , identica a quella del mezzo ambiente. Se l'aria avesse potuto liberamente espandersi, alle temperature x e t avrebbe preso i volumi $1+\alpha x$ ed $1+\alpha t$; ma costretta a conservare uno stesso volume, ha fatto variare nella stessa ragione la sua forza elastica, che in tal modo è passata dal valore h al valore h_1 ; quindi per determinare x, si ha la proporzione:

$$1+\alpha x : 1+\alpha t = h : h_1 ;$$

donde:

$$x = \frac{h(1+\alpha t) - h_1}{h_1 \alpha}.$$

Ponendo in quest' ultima espressione $h=766^{mm},5$; $h_1=766^{mm},5-3^{mm},61=762^{mm},89$; $t=12^{\circ},5$, $\alpha=0,003665$, si troverà $x=13^{\circ},84$; e poichè l'aria aveva già la temperatura di $12^{\circ},5$; quindi il calore svolto dalla compressione risul-

ta di 1°,34. Questo valore però ha bisogno di esser aumentato della frazione che se n'è trasfusa nell'aria sopraggiunta; la quale frazione avrà col numero 1,34 lo stesso rapporto che la massa dell'aria residua aveva con quella dell'aria rientrata. Or l'aria residua aveva la tensione:

$$766^{mm},5-13^{mm},01=753^{mm},49\ ;$$

riaperto il robinetto dell'apparecchio si ebbe definitivamente:

$$766^{mm},5-3^{mm},61=762^{mm},89.$$

Vi fu dunque un accrescimento di forza elastica e quindi di massa di aria, nel rapporto di $9^{mm},4$ a $753^{mm},49$, o prossimamente di 1 a 80. Nella stessa ragione bisognerà che cresca il numero 1,34 di sopra ottenuto, e così avremo 1°,3567 per espressione del calore svolto dalla compressione.

Or sapendo che l'aria per ogni grado di temperatura si dilata di 0,003665 del suo volume a 0°, cerchiamo quale dose di calore essa svolge quando il suo volume è diminuito di 0,003665, o in altri termini quanto calore assorbe per dilatarsi della stessa frazione. Questa quantità di calore risulta dalla proporzione:

$$\frac{1}{80}:0,003665=1^{\circ},3567:x\ ,$$

la quale ci dà $x=0^{\circ},3977$. Questa frazione di calore l'aria dunque assorbe per dilatarsi allorchè si riscalda di un grado, quindi per la dilatazione corrispondente a t gradi essa assorbirà $0,3977t$. Ma questa quantità è quella che abbiamo chiamata t' nella formola che ci ha dato il rapporto $\frac{c}{c'}$; quindi avremo:

$$\frac{c}{c'}=1+\frac{0,3977t}{t}=1,3977\ ,$$

che prossimamente esprimerà il rapporto delle due capacità termiche c e c'.

Egli è chiaro che questo metodo diretto non è applicabile a corpi gassosi diversi dall'aria. Dulong purtuttavia ha saputo escogitarne uno indiretto, e ch'esporremo nel Libro V.

95. La capacità termica di un corpo è crescente colla sua temperatura, come dimostrano i seguenti risultati che Dulong e Petit ottennero pel ferro, e Pouillet pel platino. Dipendenza del calore specifico dalla temperatura.

Temp. del ferro	*Capacità medie*
Da 0° a 100°	0,1098
— 0° a 200°	0,1150
— 0° a 300°	0,1218
— 0° a 350°	0,1255

Temp. del platino	*Capacità medie*
100°	0,03350
000	0,03434
500	0,03518
700	0,03602
1000	0,03728
1200	0,03818

Si è osservato d'altronde che le capacità termiche dei corpi che hanno una stessa natura chimica, sono minori a misura ch'è più grande la loro densità. Così pel carbone di legno, la grafite ed il diamante, che chimicamente rappresentano uno stesso corpo, si è trovato:

	Densità.	*Calore specifico.*
Carbone di legno	2,00	0,241
Grafite	2,50	0,202
Diamante	3,50	0,147

Da questa coincidenza della parte dovuta alla densità del corpo coll'altra spettante alla sua temperatura, pare doversi conchiudere che il grado di calore del corpo non altrimenti influisca sulla grandezza della sua capacità termica, se non facendo variare la densità.

CAPO SESTO.

CANGIAMENTO DI STATO.

Fusione dei solidi.

96. Un successivo aumento di temperatura fa sempre più grandi gl'interstizii molecolari di un solido, e con ciò sempre più debole la sua forza di coesione. E poichè la diversa energia di questa forza è quella che rende i solidi fisicamente diversi dai liquidi, così si comprende come un riscaldamento crescente possa trasformare un solido in liquido, e vi pervenga tanto più facilmente per quanto il solido è più dilatabile. Così il platino, che tra i metalli meno si dilata, può tollerare altissime temperature senza liquefarsi.

Ogni solido ha una quantità definita di coesione molecolare, e quindi una definita temperatura pel suo passaggio a liquido. Perciò il *grado di fusione* si annovera tra le qualità distintive dei solidi; e la tavola seguente ne dà i valori numerici per parecchi di essi.

Nomi delle sostanze.	*Gradi di fusione.*	*Nomi delle sostanze.*	*Gradi di fusione.*
Ferro inglese battuto	1600	Piombo	334
Ferro dolce francese	1500	Bismuto	256
L'acciaio meno fusibile	1400	Stagno	230
L'acciaio più fusibile	1300	Lega di 5 atomi di stagno ed 1 di piombo	194
Ferro fuso combinato con manganese	1250	— 4 stagno, 1 piombo	189
Ferro fuso bigio 2ª fusione	1200	— 3 stagno, 1 piombo	186
Idem molto fusibile	1100	— 2 stagno, 1 piombo	196
Ferro fuso bianco, poco fusibile	1100	— 1 stagno, 1 piombo	241
Idem molto fusibile	1050	— 1 stagno, 3 piombo	289
Oro purissimo	1250	— 3 stagno, 1 bismuto	200
Oro al titolo delle monete	1180	— 2 stagno, 1 bismuto	167,7
Argento purissimo	1000	— 1 stagno, 1 bismuto	141,2
Bronzo	900	— 1 piombo, 4 stagno, 5 bismuto	118,9
Antimonio	432	Solfo	109
Zinco	360	Iodo	107

Lega di 2 piombo, 3 stagno, 9 bismuto	100	Cera bianca	68
— 5 piombo, 3 stagno, 8 bismuto	100	Cera non imbianchita	61
— 4 bismuto, 1 piombo, 1 stagno	94	Acido margarico	55 a 60
Sodio	90	Stearina	60
Potassio	58	Spermaceto	49
Fosforo	44	Acido acetico	45
Acido stearico	70	Sego	33
		Ghiaccio	0
		Olio di terebentina	—10
		Mercurio	—40

Quando la temperatura di un solido avrà raggiunto il grado di fusione, essa rimarrà costante fino alla compiuta trasformazione in liquido, qualunque energia si abbia la sorgente calorifera. Gli Accademici del Cimento riempirono di ghiaccio trito un vase di piombo contenente un termometro, e lo circondarono di acqua bollente: il termometro restò a 0° finchè il ghiaccio non fu del tutto fuso. Più tardi Deluc volendo ripetere l'esperimento degli Accademici, pose a ghiacciare dell'acqua pura con entro un termometro in un ambiente di più gradi sotto zero: l'acqua gelò bentosto, ed il termometro segnò il grado del mezzo ambiente. Ma quando il vase fu esposto al fuoco, il termometro salì a 0°, donde non si mosse, prima che il ghiaccio non fosse interamente liquefatto.

97. Sappiamo (pag. 136) che il coefficiente di dilatazione dei solidi deve risultare crescente per eguali addizioni di calore, e già nei metalli lo è sensibilmente oltre la temperatura 100°. Questa variazione però, che segue una certa legge di continuità fino ad un grado prossimo a quello di fusione, presenta poi un salto, che forma come l'origine di un'altra serie continua che si prolunga oltre la liquefazione del solido. E la continuità è rotta da un subitaneo incremento di volume pei solidi che fondendosi vieppiù si espandono, e lo è viceversa da subitanea contrazione per quei solidi che nel passare a liquidi prendono un volume minore, come sono il ghiaccio, il ferro, il bismuto, l'argento.

Volume dei solidi presso al punto di fusione.

Di queste ricerche si sono occupati prima Billet; indi Kopp che sperimentando sul fosforo, la cera, la stearina, ed il ghiaccio ottenne i seguenti risultati:

Il fosforo prima e dopo la fusione si è dilatato quasi che

uniformemente, ma presso al punto di fusione il suo volume è passato istantaneamente da 1,0160 a 1,0517 ; e sotto questo volume era già fluido — In simili circostanze il volume del solfo è passato da 1,0956 a 1,1504; mentre il ghiaccio fondendosi si è contratto nella ragione di 1 a 0,87 — La stearina poi ha presentato il notevole fenomeno di una subitanea contrazione a 50°, dopo la quale ha ripreso a dilatarsi e rapidamente fino a 60°, ch'è il suo grado di fusione.

L'apparecchio all'uopo usato da Kopp, è rappresentato dalla fig. 78. Il corpo da sperimentarsi, era contenuto nel tubo di vetro *a*, e questo veniva introdotto nel cilindro A, chiuso da un pezzo di sughero, reso impermeabile dall'acqua mercè d'immersione in olio caldo. Per l'asse del sughero passava il tubo B, diviso in parti di eguale capacità. Introdotto il tubo *a* in A, questo si empiva di un liquido che non avesse azione chimica sul solido messo ad esperimento; indi si poneva l'apparecchio in un bagno di olio gradatamente riscaldato, e dall' innalzamento della colonna liquida nel tubo B si deduceva la dilatazione del corpo messo a pruova.

Assorbimento di calore nella fusione.

98. Un fatto, che si poteva facilmente rilevare dall' immobilità del termometro durante la fusione di un solido, è quello della perdita di forza calorifera che ha luogo nel passaggio da solido a liquido. Per averne una pruova diretta si prendano due bicchieri eguali, e messo in ciascuno di essi un termometro , si empiano l'uno di acqua a 0° l'altro di ghiaccio pesto, e poi si circondino l'uno e l'altro di acqua bollente. Allora si vedrà salire il termometro immerso nell' acqua , ed ascendere oltre 70°, quando l'altro termometro, compiuta la fusione del ghiaccio, comincerà ad elevarsi su 0°. Per liquefare il ghiaccio dunque si consuma tanto calore , quanto ne bisogna ad un'egual quantità di acqua per elevarsi da 0° a più che 70°.

Considerando i fenomeni termici come effetti di una massa più o meno grande di un fluido speciale , il consumo di forza calorifera avvenuto nell'atto della fusione doveva necessariamente attribuirsi ad una certa quantità di quel fluido fattasi aderente alle molecole del corpo, e che perciò non dava indi-

zio della sua presenza. Quindi la denominazione di *calore latente*, tuttavia adoperata nella scienza, quantunque oggi sarebbe cosa assai difficile il volerne giustificare il concetto.

Se l'esperimento qui sopra citato ha potuto dimostrare l'esistenza del fatto, non era poi atto a darne giusta misura. A tal uopo gioverà procedere nel seguente modo : in una massa di acqua, definita in peso e temperatura, si facciano cadere e prontamente liquefare dei pezzetti di ghiaccio già asciugati con pannolino , finchè non si produca un sensibile abbassamento di temperatura, che sarà esattamente determinato : ed allora tornando a pesar l'acqua, si conoscerà il peso del ghiaccio che si è fuso. Sia m questo peso, M quello dell'acqua, t la sua temperatura iniziale , t' quella a cui discese pel sofferto raffreddamento , ed x il numero delle calorie consumate per attuazione dello stato liquido. Sarà $M(t-t')$ il numero delle calorie perdute dall'acqua , ed $m(t'+x)$ quelle guadagnate dal ghiaccio fuso; quindi per determinare x si avrà l'equazione :

$$M(t-t')=m(t'+x).$$

Facendo scrupolosa valutazione sì della parte dovuta al mezzo ambiente , che di quella spettante al recipiente ed al termometro, De La Prevostaye e Desains trovarono $x=79^{\circ},25$; e questo numero fu poi rifermato da sperienze di Regnault. Ma prima che la scienza fosse in possesso di questo risultamento , che per le cure avute nel determinarlo può ritenersi come esatto, Black che fu lo scovritore del fatto che poi denominarono *calore latente*, aveva ottenuto il numero $77^{\circ},25$; indi Wilcke mercè l'esperimento dei due bicchieri di sopra indicato, aveva 72°; e più tardi ancora Lavoisier e Laplace da sperienze istituite col calorimetro deducevano il numero 75°, che fu ricevuto da tutti i fisici fino all'epoca dei risultamenti di De La Prevostaye e Desains.

99. L'assorbimento di calore nell'atto della fusione ha sì stretto legame con questo cangiamento di stato, che si appalesa sotto forma di considerevole abbassamento di temperatura, quando la liquefazione è prodotta con tutt'altro mezzo che

Miscugli frigorifici.

per azione termica. Ne sono una pruova i così detti *miscugli frigorifici*, che tutti consistono in mescolanze di sali solubili e neve, od anche di qualche sale ed acqua. L'azione chimica che spinge il sale a sciogliersi nell'acqua richiede l'opera sussidiaria del calore, che non avendosi donde togliere, è sottratto dal miscuglio stesso: così 1 parte di sal comune con 3 parti di neve fanno scendere la temperatura della mescolanza da 0° a —17°,7.

Su questo principio sono costruiti gli apparecchi che servono alla formazione del ghiaccio artificiale. Quello di Grubeaud è rappresentato dalla fig. 102. Componesi di un sistema A di tubi conici, rappresentato in pianta e secondo una scala più grande dalla fig. 105. Il sistema dei tubi è contenuto in un recipiente destinato a ricevere un miscuglio quasi a parti eguali di acqua e nitrato di ammoniaca, che vi si scioglie rapidamente dando al sistema una celere rotazione per mezzo della manovella B; ed il calore che se ne assorbe è tanto che ne rimane ghiacciata l'acqua di cui son pieni i tubi conici.

Passaggio dei liquidi a solidi.

100. La temperatura per la quale un corpo passa da liquido a solido, è generalmente la stessa che quella in cui si compie la sua fusione. Abbiamo ritenuto che questa avvenga ad un grado costante di calore; ed in vero le condizioni da cui questo grado potrebbe esser modificato, e di cui parleremo nel capo seguente, non possono aver luogo che artificialmente e sotto qualche forma soltanto: ma non è lo stesso delle cagioni perturbatrici del grado di solidificazione. Il ghiaccio, a modo di esempio, si fonde costantemente a 0°, quando non sia sottoposto a pressioni grandissime e permanenti, ciò che non ha giammai luogo in natura; ma l'acqua che ordinariamente si congela a 0°, può conservarsi liquida per molti gradi sotto lo zero, quando sia distillata e conservata in perfetta calma o chiusa in tubi di piccolo diametro. Gli Accademici del Cimento furono primi ad avvertire non esservi cosa più variabile del grado di congelazione dell'acqua, e che quando questo liquido è già freddo abbastanza per trasformarsi in solido, basterà scuotere il vase che lo contiene, per vederlo ghiacciare in un

istante. Risultamenti analoghi ebbe più tardi il Fahrenheit coll'acqua distillata che potè conservar liquida parecchi gradi sotto 0°. Covrendola di uno strato di olio Gay-Lussac riuscì a raffreddarla fino a —12°; e Despretz l'ebbe liquida anche a —20°, empiendone dei tubi da termometri, che prima di esser chiusi furono privati di aria per mezzo dell'ebollizione. L'acqua limacciosa o che contonga comunque delle sostanze in sospensione, si congela costantemente a 0°; ed in ciò Blagden trovò la ragione per cui l'acqua che ha bollito ghiaccia più facilmente, essendochè l'ebollizione fa che le sostanze calcari che vi erano disciolte, vi rostino poi sospese. Ed in generale le sostanze acide, saline ed alcaline, che siano disciolte nell'acqua, ne fanno bassare il punto di congelazione: così l'acqua, che sia satura d'idroclorato di calce, può aversi liquida anche a —40°.

101. Se nella fusione vi è assorbimento di calore, la solidificazione di un liquido viceversa ne produce; ma perchè il calore così prodotto divenga sensibile, il passaggio a solido vuol esser rapidissimo. Così facendo cadere un qualunque solido in una massa di acqua, che senza congelarsi si è potuta raffreddare di 10 in 12 gradi sotto zero, si vedrà l'acqua ghiacciare all'istante ed il termometro salire celeramente a 0°. Similmente avviene per un sale che cristallizzando si separa dal liquido in cui era disciolto. Per averne una pruova si sciolgano tre parti di solfato di soda in due parti di acqua abbastanza calda, e dopo avervi immerso un termometro si copra la soluzione con un sottile strato di olio, e si lasci tranquillamente raffreddare. Il liquido che senza lo strato di olio avrebbe deposto dei cristalli a misura che si sarebbe raffreddato, ora scenderà fino alla temperatura del mezzo ambiente senza mostrarne alcuno. Ma se allora si scuota il recipiente, o vi si lasci cadere un pezzetto solido qualunque, si vedrà sorgere un gruppo di cristalli ed il termometro salire di 15 in 20 gradi. Calore che se ne svolge.

Questo calore svolto nella solidificazione non è, al dir dei fisici, che il calore assorbito nella fusione. Ma questo concetto, ch'è una vera necessità logica nell'ipotesi di un fluido ca-

lorifero per quantità di massa , non avrebbe poi alcun che di reale nell'altra ipotesi che attribuisce i fenomeni termici a vibrazioni di un etere. E per fermo, che vorrebbe mai dire una vibrazione latente? — Frattanto l'ipotesi , che diede origine all'idea di calore latente, non è più ammisibile.

Cangiamento di volume nella solidificazione.

102. I liquidi in generale scemano di volume passando a solidi; ma l'acqua, il ferro fuso, il bismuto fuso , ecc. lo accrescono in vece. Perciò avviene che il ghiaccio galleggia anche sull'acqua a 100°; che il ferro fuso riproduce esattamente le forme in cui si è versato; e che il bismuto congelandosi rompe i tubi di vetro in cui è stato fuso.

Grande, come per ogni altra azione molecolare , è la forza meccanica che per simili espansioni si produce. Negli sperimenti all'uopo istituiti dagli Accademici del Cimento l'acqua ghiacciando ha rotto dei recipienti di doppio cristallo , di bronzo , di rame , ecc. ; e per una sfera cava di quest' ultimo metallo la forza espansiva del ghiaccio è stata, secondo un calcolo istituito da Muschenbroeck, pari a libbre 27720. Il Maggiore Williams, trovandosi a Quebec durante un rigido inverno, empì di acqua una bomba di un piede di diametro, e dopo averla chiusa con turacciuolo di legno fattovi entrare a colpi di martello, l'espose all'aria essendovi la temperatura di —28°. Non tardò a farsi sentire una violenta esplosione , dietro la quale si rinvenne che dalla bomba usciva una prominenza di ghiaccio lunga 8 pollici , mentre il turacciuolo di legno era stato lanciato oltre a 400 piedi di distanza.

Gassificazione dei liquidi.

103. Continua è la tendenza dei liquidi a trasformarsi in *vapori*, ossia in fluidi invisibili, e che al pari dell'aria tendono a sempreppiù espandersi.

La quantità di liquido , che in un dato tempo si trasforma in vapore, riesce più o meno grande secondo che la temperatura del liquido è più o meno elevata : così vediamo i pannolini sotto l'azione diretta del sole asciugarsi più presto che all'ombra. E la quantità di vapore prodotta in un dato tempo può talmente crescere colla temperatura che ad un certo grado di calore e sotto una data pressione il corpo non può esi-

stere che in forma di vapore. L'acqua, a modo di esempio, sotto l'ordinaria pressione dell'atmosfera non può rimaner liquida a 100°. Come, viceversa, può darsi tale abbassamento di temperatura, che nessuna quantità di liquido si trasmuti in vapore. Faraday ha osservato che a quattro gradi sotto zero una foglia di oro che chiudeva un recipiente di vetro con alquanto mercurio, affatto non s'imbiancava; vale a dire che a quel grado di calore il mercurio non dava sensibile quantità di vapore. Ma non per ogni liquido esiste un siffatto limite di volatilità, stante che l'acqua dà valutabile quantità di vapore anche quando si rattrova sotto la forma di neve; della qual cosa potremo assicurarci equilibrando in una sensibile bilancia un pezzo di neve quando l'aria è secca e di qualche grado inferiore a 0°, imperocchè allora osserveremo che la bilancia dopo non molto tempo comincerà ad inclinarsi dal lato dei pesi.

L'evaporazione si attua sempre con assorbimento di calore. Quel freddo che proviamo uscendo da un bagno, provviene appunto dall'evaporazione dell'acqua restata aderente al nostro corpo; e per la stessa ragione avviene ancora che la saldatura che unisce il fondo alla parete laterale di una caffettiera di latta non si fonde su i carboni roventi, finchè nella caffettiera vi sarà del liquido. A presentare questo principio sotto una forma più spiccata serve l'apparecchio indicato dalla fig. 88. Si compone di un tubo di vetro che termina in due palline: è in parte pieno di alcool colorato, e nel resto è voto di aria. Girate le palline in basso e distribuito tra esse il liquido, se ne circondi una di neve e sale; e bentosto si vedrà l'altra appannarsi di rugiada. Ciò dimostra il raffreddamento patito dal vetro per l'evaporazione dell'alcool, accelerata dalla continua liquefazione del vapore nella pallina circondata di neve. E se in vece giriamo le palline in alto, e teniamo orizzontalmente sospeso l'apparecchio chiudendo in mano una delle palline, vedremo il liquido zambillare nell' altra pallina con celerità più o meno grande secondo che la mano si troverà più o meno calda; e quando l'ultimo residuo di liquido sarà per esservi lanciato, proveremo nella mano una sensazione di fresco,

cagionata dall'evaporazione di quel velo liquido che l'alcool lasciava sulla faccia interna della pallina che tenevamo stretta.

Mercè lo stesso principio si rende ragione del metodo usato in Egitto e nel mezzogiorno della Spagna per rinfrescare l'acqua durante il forte calore della state. La si pone in vasi di argilla assai porosi, che si sospendono in luoghi ombrati ed esposti alla libera circolazione dell'aria; così si ottiene una celere evaporazione del liquido che continuamente trapela alla superficie esterna del vase, e quindi un notevole abbassamento di temperatura. Così ancora nelle Indie, per avere una corrente di aria fresca nell' interno delle abitazioni, si chiudono le finestre con graticci di ramoscelli, e questi si bagnano di tempo in tempo; l'aria, che vi penetra, è rinfrescata dall'acqua che svapora dalla superficie dei ramoscelli.

Il freddo prodotto da una celere evaporazione può risultare così forte da gelare non solo l'acqua, ma il mercurio ancora. Pongasi sotto la campana pneumatica un piattino di vetro con acido solforico anidro, e sul piattino elevisi mercè un piccolo trepiede una sottile capsuletta metallica con entro un poco di acqua a contatto del bulbo di un termometro. Fatto il voto e chiuso l'adito dell'aria, si vedrà il termometro lentamente discendere finchè l'acqua non sarà ghiacciata. Pel mercurio poi basterà circondare con un pezzo di spugna il bulbo di un termometro, indi bagnarlo nel solfuro di carbonio o in altro liquido sommamente volatile, ed agitarlo nell'aria.

L'esperimento della congelazione dell' acqua nel voto pneumatico, esperimento dovuto a Leslie, è notevole per un importante legge che ci rivela. Rifacendo la pruova senza estrarre l'aria dalla campana, l'acqua appena presenterà un leggiero raffreddamento; segno evidente che l'aria si è opposta alla celerità dell'evaporazione. E poichè l' esperienza ha dimostrato che ogni altro gas non avente azione chimica nè sull'acqua nè sull'acido solforico, produrrebbe altrettanto, è chiaro che la resistenza opposta dall'aria è stata tutta meccanica, ossia semplice effetto della sua pressione; quindi è che nel voto pneumatico, ma senza l'intervento dell'acido solforico che assorbe

il vapore a misura che si forma, il fenomeno neppure ha luogo, stante che appena saturata di vapore la capacità della campana, l'acqua che vi si trova non può più somministrarne.

All'influenza che la temperatura, la speciale natura del liquido e la pressione cui soggiace, hanno sulla quantità di vapore prodotta in un dato tempo, fa d'uopo aggiunger anche quella che vi ha la grandezza dello spazio destinato a riceverlo. Saussure osservava che l'acqua, svaporando in uno spazio definito e perfettamente secco, produce a 15°R. tal quantità di vapore che ogni piede cubico ne contiene 10 granelli; e che questo peso sotto l'indicata temperatura rimane costante, sia l'acqua svaporata in uno spazio voto; sia in uno spazio occupato dall'aria o da un gas qualunque. E da ricerche posteriori si è ancora ottenuto che la presenza di un vapore qualunque in uno spazio definito non impedisce che altro liquido vi diffonda il suo vapore in quella quantità che ne avrebbe prodotta se lo spazio fosse stato voto, purchè tra le due specie di vapore non intervenga verun'azione chimica.

Ebollizione.

104. Quando un vase pieno di liquido viene adagiato sopra un fornello, il calore comunicato al fondo del recipiente invade la prima falda liquida che incontra, la dilata, e perciò fatta più leggiera è costretta di salire a galla. Per la stessa ragione alla prima falda terranno dietro la seconda, la terza, ecc.; e così verranno a stabilirsi nella massa liquida due correnti, l'una ascendente calda e l'altra discendente fredda. Esponendo all'azione di una fiamma un recipiente di cristallo (Fig. 85) contenente acqua che abbia in sospensione un poco di segatura di legno, si renderanno sensibili le due correnti, l'una che ascende per la parete laterale del recipiente, l'altra che discende per lo mezzo. Con questo continuo movimento l'acqua andrà sempre più riscaldandosi, finchè le sue falde, ritornando al fondo, non abbiano tale calore che aggiunto a quello che vanno ad assorbire, sia valevole a cangiarle istantaneamente in vapore. Allora esse si trasformeranno l'una dopo l'altra in bolle gassose, che salendo con grande velocità per l'estrema loro leggerezza, produrranno nella massa liquida quel-

l'agitazione in cui sta propriamente il fenomeno dell' ebollizione. Ma prima che strati di una certa doppiezza si siano ridotti subitaneamente in vapori, altri più sottili avran fatto altrettanto, producendo quelle piccole bollicine, che da prima aderenti al fondo, poi se ne staccano eccitando nel recipiente una certa vibrazione donde deriva quel suono foriero dell' ebollizione.

Allorchè un liquido comincia a bollire, la sua temperatura cessa di elevarsi, e tutto il calore che sopraggiunge, è interamente assorbito pel cangiamento di stato. Perciò avviene che applicando la palma della mano al fondo ben terso di una caldaia di acqua bollente allora tolta dal fuoco, non si prova che un dolce calore.

Il grado di temperatura a cui comincia l'ebollizione, varia secondo la natura del liquido, la pressione a cui è sottoposto e le sostanze che potrà tener disciolte. La tavola seguente contiene le temperature di ebollizione di diversi liquidi sotto l'ordinaria pressione dell'atmosfera.

Etere solforico	37°,3
Carburo di solfo	47 ,0
Alcool	79 ,7
Olio di terebentina	157 ,0
Fosforo	290 ,0
Solfo	299 ,0
Acido solforico	310 ,0
Olio di lino	316 ,0
Mercurio	360 ,0

Quanto all'influenza della pressione sulla temperatura di ebollizione, essa è chiarita a sufficienza dai seguenti fatti. Ponendo sotto la campana pneumatica un bicchiere con acqua a circa 60°, basteranno pochi colpi di stantuffo per vederla bollire. Al contrario l'acqua nella *pignatta di Papin* può prendere altissime temperature senza gassificarsi. Questa pignatta non è che un cilindro di bronzo o di ferro fuso (Fig.84) con un coverchio a vite, su cui avvi un foro chiuso da una valvola, che vi è premuta per mezzo di un braccio di leva carico di peso; e se-

condochè questo peso sarà maggiore o minore, l'acqua potrà prendere una temperatura più o meno grande prima che il vapore valga a sollevare la valvola. Cagniard de la Tour chiudendo l'acqua in forti tubi di vetro, la vide interamente gassificata a 360° occupando un volume quattro volte più grande, mentre sotto l'ordinaria pressione dell'atmosfera il volume n'è più che mille volte maggiore. Sperimentando allo stesso modo sull'etere, l'alcool ed il solfuro di carbonio, ebbe che il primo si ridusse in vapore a 259° occupando un volume triplo, il secondo a 210° con un volume doppio, ed il terzo a 275° duplicando ancora il suo volume.

Mercè questa dipendenza del grado di ebollizione dalla pressione a cui il liquido è sottoposto, si comprende come sullo stesso grado possa similmente influire l'altezza del luogo in cui l'ebollizione si attua; stante che l'aria esercita una pressione decrescente a misura che si va più in alto. Facendo bollire una stessa acqua in due recipienti presso che eguali e formati di una stessa sostanza, situati l'uno sul suolo e l'altro sopra un alto terrazzo, si troverà che il primo avrà una temperatura un poco superiore a quella del secondo. E più grande risulterebbe la differenza di temperatura, se maggiore fosse la differenza di livello tra i due punti di osservazione: così mentre l'acqua bolle a 100° al livello del mare, la sua ebollizione avviene a 92°,9 all'Ospizio del San Gottardo, e toccherebbe appena 84° sulla cima del Monte Bianco.

Ma l'influenza dell'altezza sul grado di ebollizione dell' acqua può rendersi sensibile anche per differenze di livello che non eccedano 5 a 6 piedi, quando se ne osservi la temperatura con un termometro, qual'è rappresentato nella fig. 92. Il cannello di questo termometro è sottilissimo, e ad un terzo circa della sua lunghezza si espande nella pallina *c*, destinata a raccogliere il mercurio che per un riscaldamento di 96 in 97 gradi si eleva nell'interno del cannello. Per una temperatura maggiore il mercurio s'innalza nella rimanente porzione *ce* del cannello, sulla quale restano ad esser segnati gli altri tre o quattro gradi che bisognano per giungere a 100°; e poi-

chè il tubo è sottilissimo, così ciascuno dei gradi residui potrà avere quasi due pollici di lunghezza, e vi si potrà leggere in conseguenza anche il centesimo di grado.

L'influenza della pressione sul bollimento dei liquidi rende ragione del seguente fatto. Messa dell'acqua in un matraccetto di vetro (Fig.91), si esponga all'azione di una fiamma; e quando il liquido sarà giunto a bollire, si chiuda il matraccio con turaccio di sughero e si capovolga. Allora l'ebollizione sarà cessata, ma ricomparirà di nuovo toccando il matraccio con acqua fredda, e cesserà una seconda volta bagnandolo con acqua assai calda. L'acqua fredda addensando parte del vapore ne ha scemata la tensione, e perciò l'ebollizione è ricominciata ; al contrario l'acqua calda accrescendo la tensione del vapore l'ha fatta cessare una seconda volta.

La dipendenza poi del grado di ebollizione dell' acqua dalla natura delle sostanze che vi potranno esser disciolte, si rileva dalla seguente tavola, in cui sono notati i risultamenti ottenuti da Legrand.

NOMI DELLE SOSTANZE.	PUNTO DI EBOLLIZIONE IN CENTIGRADI.	QUANTITA' DI SALE CHE SATURA 100 DI ACQUA.
Clorato di potassa	104,2	61,5
Cloruro di bario	104,4	90,1
Carbonato di soda	104,6	48,5
Fosfato di soda	106,5	113,2
Cloruro di potassio	108,3	59,4
Cloruro di sodio	108,4	41,2
Idro-clorato di ammoniaca	114,2	88,9
Tartrato neutro di potassa	114,67	296,3
Nitrato di potassa	115,9	335,1
Cloruro di stronzio	117,9	117,5
Nitrato di soda	121,0	224,8
Acetato di soda	124,37	209,0
Carbonato di potassa	135,0	205,0
Nitrato di calce	151,0	362,2
Acetato di potassa	169,0	798,2
Cloruro di calcio	179,5	325,0
Nitrato di ammoniaca	180,0	infinita

Tra le sostanze che per la loro soluzione nell'acqua ne pos-

sono far variare il punto di ebollizione, vuol essere annoverata anche l'aria, stante che Deluc dopo averla esattamente privata di questo gas potè riscaldarla fino a 121°C senza che bollisse, e più tardi Donny l'ebbe liquida anche a 135°.

Ma qualunque sia il grado a cui si elevi la temperatura dell'acqua per effetto di sostanze che vi stanno disciolte, il suo vapore avrà sempre il grado di calore che avrebbe acquistato emanando in consimili circostanze dall'acqua pura. Questo importantissimo fatto, scoverto da Rudberg, può dimostrarsi mercè l'apparecchio rappresentato dalla fig. 80. Ponendovi successivamente a bollire parecchie delle soluzioni indicate nella tavola precedente, si vedrà che per azione dei loro vapori il termometro prenderà sempre la stessa temperatura, e propriamente quella che allora gli avrebbe comunicata il vapore provveniente dall'ebollizione di acqua pura.

Osserviamo in ultimo che anche la speciale natura del recipiente influisce sul grado di ebollizione di un liquido. L'acqua, a modo di esempio, bolle nei vasi di vetro ad una temperatura un poco più alta che nei vasi metallici. E pare che ciò debba provvenire dall'adesione del liquido alla parete del recipiente, imperocchè l'ebollizione in simili casi procede a salti che scuotono fortemente il recipiente, e che sono prodotti dal grande volume che assumono le bolle prima di staccarsi dal fondo del vase. È così che quando si fa cuocere la polvere di caffè tostato si eleva quella grossa bolla spumosa, che se non si avesse cura di rompere col cucchiaio, proietterebbe il liquido bollente fuori della caffettiera. Per simili bolle e per le scosse che ne seguono, l'acido solforico non di rado rompe le storte di vetro in cui si fa bollire. Avvi però delle sostanze, come il platino per l'acido solforico, il ferro e lo zinco per l'acqua, che rendono placida l'ebollizione del liquido; mentre il tartrato neutro di potassa fa che nell'ebollizione dell'acqua le scosse divengano assai gagliarde.

105. Nel 1757 Leidenfrost scovriva che facendo cadere delle gocce di acqua sopra una lamina rovente, esse in vece di ridursi rapidamente in vapore si compongono in una goccia sola Stato sferoidale.

che prende rapido movimento di rotazione talvolta congiunto a traslazione, e finisce col ridursi lentamente a vapore. Questo fenomeno è stato obbietto di ricerche per molti fisici, e specialmente se n'è occupato Boutigny, il quale non solamente ha confermato i risultamenti dei suoi predecessori, ma ne ha ottenuto dei nuovi oltremodo rimarchevoli. Egli ha disegnato questa classe di fenomeni sotto il nome di *stato sferoidale* dei liquidi o di *fenomeni di calefazione*.

Tutti i corpi capaci di ridursi a vapore passando per lo stato liquido, possono assumere lo stato sferoidale in contatto di lamine roventi. Nè la temperatura della lamina dev'esser sempre altissima, ma deve piuttosto avere una certa ragione al metallo che si riscalda ed al liquido che deve toccarlo. Col platino Boutigny ha ottenuta la calefazione dell'acqua a 200° ed anche a 171°, e coll'argento a 142°; per l'etere poi è stata sufficiente la temperatura di 61°; ed in generale la lamina vuol essere tanto più riscaldata, quanto più alto è il grado di ebollizione del liquido.

Immergendo nel liquido calefatto il bulbo di un termometro espressamente costruito, Boutigny vi ha trovata sempre una temperatura inferiore a quella dell'ebollizione: così l'acqua ha dato 95°,5; l'alcool 75°,5; l'etere 34°,29; e l'acido solforoso liquido —10°,5. Quindi si comprende la ragione del seguente fatto, che senza dubbio è l'effetto più meraviglioso che siasi ottenuto dal giuoco delle forze molecolari. Ridotto l'acido solforoso liquido a stato sferoidale in una capsula riscaldata a calor bianco, vi si versi a goccia a goccia un poco di acqua distillata, la si vedrà immediatamente ghiacciare; e se l'acido solforoso venisse calefatto in un ambiente alquanto umido, basterebbe il solo assorbimento del vapore atmosferico a deporre un ghiacciuolo sulla goccia calefatta. Variando il modo di sperimentare Boutigny ottenne lo stesso effetto ma sotto forma più sorprendente. Egli fece riscaldare a bianco la mufola di un forno a coppella ed arroventare al fuoco una capsula di platino, che dopo avervi versato un gramma di acido solforoso anidro chiuse nella mufola, lasciando un piccolo spiraglio pel

passaggio dell'aria e per poter osservare il liquido. Sperimentando con un tempo umido, egli vide il vapore atmosferico congelarsi sulla goccia calefatta, quantunque chiusa in un recinto ad altissima temperatura.

Il liquido calefatto non tocca la sottoposta lamina, poichè sperimentando al buio, e ponendo la fiamma di una candela all'altezza della lamina, tra questa e la sferoide calefatta si potrà vedere dal lato opposto una porzione di fiamma. E per ovviare all'obbiezione che le apparenze sarebbero le stesse, ove per avventura la goccia battesse sulla lamina con oscillazioni sì rapide da compierne una diecina almeno per ogni minuto secondo, noi diciamo che Poggendorf ha trovato non darsi transito alla corrente elettrica dalla goccia alla lamina, ciò ch'è la pruova di una permanente separazione dei due corpi.

I fisici per dar ragione della bassa temperatura della goccia calefatta, comparatamente all'alto calore della lamina su cui si trova, avevano supposto che il calore raggiato dal corpo rovente traversasse la goccia senza riscaldarla; ma dalle seguenti sperienze di Boutigny risulta in vece che il calore in massima parte è riflesso dalla superficie della goccia. Fermando con apposito sostegno a due millimetri di distanza dal fondo di una capsula rovente di platino il corpo di un piccolo matraccio contenente un centimetro cubico di acqua, egli vide che questo liquido non tardava a bollire; e ciò dimostrava che il calore raggiato dalla capsula era assorbito dal vetro e trasmesso al liquido. Ma quando si fece a ripetere la pruova circondando il corpo del matraccio con una goccia calefatta di acqua, più non ebbe il fenomeno dell'ebollizione; nè meglio riuscì la cosa quando la goccia calefatta fu di acqua in cui erasi stemperato del nerofumo, sostanza che avidamente assorbe il calore. Ed in fine gioverà notare che quando il liquido calefatto era l'acido solforoso, bastava che il matraccio vi fosse immerso per mezzo minuto, perchè l'acqua che vi era contenuta ne rimanesse ghiacciata.

106. Un corpo può tornare da vapore a liquido, o per aumento di pressione, o per sottrazione di calore, o per queste due Liquefazione dei vapori.

cagioni combinate insieme. Per osservarne gli effetti prendasi un tubo di vetro lungo circa 30 pollici e chiuso in un estremo; si empia di mercurio a meno di poche linee che verranno occupate dall' etere o da altro liquido volatile; indi se ne chiuda l'estremità libera, e s'immerga capovolto in un bagno di mercurio a sufficienza profondo. Il liquido volatile si porterà verso l'estremità superiore del tubo; ivi se ne trasformerà una parte in vapore, l'altra resterà a galla sul mercurio che la pressione atmosferica manterrà nel tubo superiormente al livello esterno. Immergendo vieppiù il tubo nel bagno si vedrà diminuire lo spazio in esso occupato dal vapore, e crescere la doppiezza dello strato liquido galleggiante sul mercurio; e sollevando viceversa il tubo i due fenomeni procederanno in senso inverso. Col primo movimento si è accresciuta la pressione sul vapore, ed una parte se n' è liquefatta; col secondo in vece la pressione si è fatta minore, e nuovo liquido si è vaporizzato. Che se in vece si faccia variare la temperatura lasciando costante la pressione, la qual cosa si otterrà bagnando la parte superiore del tubo ora con acqua fredda ed ora con acqua calda, si vedrà salire nel primo caso la colonna mercuriale nell'interno del tubo e discendere nel secondo. E se nello stesso modo si faranno variare ad un tempo la pressione e la temperatura, gli effetti saranno più spiccati.

Nella liquefazione dei vapori vi è considerevole svolgimento di calore. Ed in vero facendo circolare per le spire di un serpentino, chiuso in una cassa metallica piena di acqua, il vapore che da simile liquido si eleva da una storta mantenuta in dolce ebollizione, si avrà condensamento del vapore acqueo, ed elevazione nella temperatura del bagno. Chiamiamo M la somma dei pesi della cassa, dell'acqua che vi è contenuta e del serpentino (pesi che supponiamo ridotti a norma della rispettiva capacità termica); t la temperatura iniziale del bagno, θ quella a cui si è elevato; m la massa del vapore condensato e T la temperatura con cui è entrato nel serpentino: avremo che il bagno avrà acquistata la quantità di calore $M(\theta-t)$, ed il vapore condensato ne avrà perduta la quantità $m(T-\theta)$. La pri-

ma, che dovrebbe essere eguale alla seconda, l'è invece di molto superiore ; e ciò indica che una certa dose di calore si è svolta nel condensamento del vapore. Chiamando x il numero delle calorie a cui essa corrisponde, avremo l'equazione:

$$M(\theta - t) = m(T - \theta) + mx ,$$

dalla quale si avrà il valore di x, supponendo che θ sia stato corretto della perdita di calore che il bagno ha sofferto per irradiazione e contatto del mezzo ambiente. Prendendo il valore medio dei risultamenti ottenuti da diversi fisici, si può stabilire $x = 540°$, vale a dire che il calore svolto nella liquefazione del vapore acqueo è sì grande che potrebbe innalzare da 0° a 100° la temperatura di una massa di acqua presso che cinque volte e mezzo più grande.

Questa quantità non è purtuttavia indipendente dalla temperatura del vapore. Sperimentando a diverse temperature su vapore che saturava lo spazio da esso occupato, Regnault ha ottenuto che la somma λ del calore di temperatura del vapore e di quello che svolgerebbe liquefacendosi è data dall'equazione:

$$\lambda = 606°,5 + 0.305t ,$$

in cui t rappresenta la temperatura del vapore. Da questa formola sono dedotti i seguenti valori della somma λ e del calore μ dovuto alla sola liquefazione.

t	λ	μ
0°	606°,5	606°,5
20	612 ,6	592 ,6
40	618 ,7	578 ,7
60	624 ,8	564 ,8
80	630 ,9	550 ,9
100	637 ,0	537 ,0
120	643 ,1	523 ,1
140	649 ,2	509 ,2
160	655 ,3	495 ,3
180	661 ,4	481 ,4
200	667 ,5	467 ,5
220	673 ,6	453 ,6

Il calore che si svolge nella liquefazione dei vapori è riguardato dai fisici come calore latente, ossia come assorbito durante la gassificazione. Senza qui ripetere quel che abbiamo detto altrove (nº 98), egli è chiaro che questa maniera di considerare il fatto non può esser giustificata che nella sola ipotesi di un fluido calorifero per sola quantità di massa.

Distinzione dei gas dai vapori.

107. Abbiamo veduto nel nº precedente come i vapori possano liquefarsi sia per aumento di pressione sia per diminuzione di temperatura. Ma non tutti i corpi aeriformi si comportano allo stesso modo: così i gas ossigeno, azoto, ecc. compressi e raffreddati non si trasformano in liquidi. Quindi è che i fluidi aeriformi si sono divisi in due specie, contraddistinte dagli aggiunti di *permanenti* e *non permanenti*: sono della prima specie tutti i gas propriamente detti, e nella seconda vanno tutti i vapori.

Purtuttavia considerando che, meno la resistenza a liquefarsi, i gas avevano in tutte le rimanenti loro proprietà una grande analogia coi vapori, i fisici vennero nell'opinione che se i gas permanenti non si erano potuti ancora liquefare, ciò dipendesse solamente dal non essere stati abbastanza premuti e raffreddati. Quindi si diedero a cercar modi di sottoporli a pressione e raffreddamento più intensi; e così il Baccelli a Bologna nel 1812 otteneva sul gas ammoniacale il primo esempio di liquefazione di un aeriforme permanente. Indi Faraday, Bussy, Thilorier liquefecero il cloro, l'acido solforoso, l'acido carbonico.

È tale il raffreddamento che quest' ultimo corpo produce colla sua gassificazione che Thilorier dirigendo sul bulbo di un termometro ad alcool la corrente di vapore, che sfuggiva per un piccolo condotto da un vase che lo conteneva allo stato liquido, vide il termometro scendere fino a —90°. Intanto un freddo così intenso non congelava che piccola quantità di mercurio, e ciò provveniva dall'imperfetta conducibilità e dalla piccola capacità termica che il vapore di acido carbonico ha comuni con tutti gli altri aeriformi. Thilorier ebbe la felice idea di aggiungere l'etere all'acido carbonico liquido; n'ebbe

così un sulliquido che presentando un contatto più esteso e raffreddando colla celerità propria dei liquidi congelò oltre a 50 grammi di mercurio in pochi secondi. Altri fisici lo adoperarono come mezzo di condensazione dei gas, e Faraday accelerandone l'evaporazione colla macchina pneumatica ha trovato le seguenti relazioni tra il gradó di rarefazione ed il corrispondente raffreddamento.

Press.	*Temp.*	*Press.*	*Temp.*	*Press.*	*Temp.*
721mm . .	— 77°	188mm . .	— 87°	61mm . .	— 99°
493 . . .	— 80	137 . . .	— 91	55 . . .	— 107
239 . . .	— 85	86 . . .	— 95	50 . . .	— 110

Alla temperatura — 110° l'alcool, l'olio di trementina, ecc. divennero densi come l'olio di oliva quando gela.

Da tutte le ricerche finora eseguite sulla liquefazione dei gas permanenti si è rilevato che la temperatura vuol essere tanto più bassa quanto la pressione è meno intensa ; dimodochè i gas permanenti non differiscono dai vapori propriamente detti se non pel diverso grado della scala termometrica, da cui comincia la loro attitudine a saturare un dato spazio sotto una data pressione.

CAPO SETTIMO.

RELAZIONI DEGLI EFFETTI TERMICI COLLE MECCANICHE ALTERAZIONI DEI CORPI.

Sperienze su i gas.

108. Assorbendo calore i corpi si dilatano, emettendone si contraggono. In conseguenza se le alterazioni dei loro volumi sono strettamente congiunte alle corrispondenti variazioni di temperatura, essi dovranno raffreddarsi quando sono meccanicamente dilatati, e riscaldarsi quando sono compressi.

Tra tutti i corpi, gli aeriformi sono quelli che meglio convengono a questo genere di ricerche, stante che i loro volumi possono ricevere rapidi e considerevoli cangiamenti, facendo variare la pressione a cui sono sottoposti. In un cilindro di cristallo a fondo chiuso, a cui sia esattamente adattato uno stantuffo, pongasi uno spirale di Breguet (n° 76), e si vedrà l'indice termometrico camminare verso 0° o verso 100°, secondochè lo stantuffo sarà rapidamente elevato od abbassato.

Il piccolo apparato, conosciuto sotto il nome di *acciarino pneumatico*, mette in evidenza la forte dose di calore che i gas possono svolgere per mezzo della compressione. È questo un tubo di ottone a fondo chiuso, lungo 7 in 8 pollici, largo parecchie linee, e che porta adattato uno stantuffo scavato nella base, per ricevere un pezzettino di esca: spinto con forza lo stantuffo in basso e tratto fuori celeramente, si troverà l'esca in combustione.

Quando una massa di aria umida si espande istantaneamente, la diminuzione della sua temperatura può divenire così forte da congelare il vapore acqueo ch'essa contiene. Nelle miniere di Schemnitz in Ungheria vi è forse tuttavia una tromba che in vece del solito giuoco di uno stantuffo, era messa in azione dall'elasticità di una massa di aria compressa da una colonna di acqua alta 40 in 50 metri. Aprendo una chiavetta che

dava uscita a quell'aria, e presentando al getto gassoso un corpo qualunque, lo si vedeva bentosto covrirsi di piccoli ghiacciuoli. Così ancora avviene che lasciando fuggir l'aria da una tromba di compressione in cui siasi fatta circa 20 volte più densa, il collo dell'apparecchio ne concepisce tal grado di freddo che il tatto non può tollerare.

109. Colladon e Sturm nelle loro ricerche sulla compressibilità dei liquidi, non trascurarono l'esame dello svolgimento di calore che poteva derivarne. Si servirono di un piccolo pallone di cristallo, le cui pareti erano doppie abbastanza per resistere a pressioni anche impulsive di molte atmosfere [1]. Il pallone, dopo avervi dentro sospesa una spirale di Breguet, si empiva del liquido su cui si voleva sperimentare, e si congiungeva ad una tromba di compressione; la quale, ora movendola con una vite perpetua, ora spingendola con una leva, ed ora percuotendone lo stantuffo a colpi di martello, produceva sul liquido o pressioni continuate e lentamente crescenti, o pressioni che duravano anche meno di un quarto di secondo, o finalmente istantanee. Allorchè l'acqua distillata fu così sottoposta ad una durevole pressione di 36 atmosfere, la spirale di Breguet indicò un grado di raffreddamento; il quale, poichè durava quanto la pressione, fu giustamente riguardato come puro effetto meccanico d' ineguale compressibilità nelle lamine della spira. Nè si ebbero più chiari indizii di svolgimento di calore, adoperando gli altri due modi di pressione; dimodochè Colladon e Sturm doverono conchiudere che dall'acqua non si ha sensibile sviluppo di calore neppure sotto una subitanea pressione di 40 atmosfere.

Sperienze su i liquidi.

Or lo svolgimento di calore non dovendo dipendere dalla sola celerità ma dalla grandezza ancora della compressione, era naturale il supporre che quel calore che non si era svolto

[1] L'aria, come vedremo nel Libro seguente, esercita una pressione sulla superficie dei corpi che vi stanno immersi; e questa pressione nel suo valore medio pareggia il peso di una colonna di mercurio alta $0^m,76$ e di una base eguale alla superficie del corpo immerso. Quindi *una pressione di più atmosfere* vuol dire una pressione eguale al peso di una colonna di mercurio di data base ed alta più volte $0^m,76$.

dall'acqua, avrebbe potuto svolgersi in pari circostanze da un liquido meno incompressibile , dall' etere per esempio. E di fatti , ponendolo a pruova i mentovati fisici osservarono che una lenta pressione di 30 a 36 atmosfere lasciava stazionario il termometro di Breguet ; la qual cosa era già un argomento di sensibile sviluppo di calore, stante che sotto un'egual pressione e similmente prodotta, la spirale aveva indicato nell'acqua un movimento verso lo zero : e quando poi si fecero ad osservare gli effetti di una subitanea compressione, videro che l'indice termometrico si moveva verso 100° di 4° e talvolta anche di 6°.

Sperienze su i solidi.

110. Berthollet, Pictet e Biot fecero insieme delle sperienze su dischi di oro, argento e rame, di grandezza da poter essere sottoposti all'azione di un torchio da zecca. Determinata anticipatamente la relazione che passava tra l' elevazione di temperatura di un dato peso dei suddetti metalli ed il grado di calore che colla sua immersione comunicava ad una certa massa di acqua, essi immergevano il disco appena ricevuto il colpo dal torchio, in una quantità di acqua sufficiente a ricoprirlo, e dall'aumento di temperatura che questa riceveva, arguivano la quantità del calore svolto dalla compressione. Così ebbero i seguenti risultati.

Dischi di rame.		*Calore svolto.*
1° colpo	1° disco	9°,60
	2° disco	11 ,56
2° colpo	1° disco	4°,06
	2° disco	2 ,50
3° colpo	1° disco	1 ,06
	2° disco	0 ,81

Dischi di argento.		*Calore svolto.*
1° colpo	1° disco	3,44
	2° disco	4,06
2° colpo	1° disco	3,25
	2° disco	1,19
3° colpo	1° disco	1,50
	2° disco	1,12

Da questi numeri si rileva — 1° Che l'argento ha svolto meno calore del rame — 2° Che la quantità di calore è andata diminuendo dal 1° colpo al 2° e da questo al 3°. Dietro questi fatti i summentovati fisici si diedero a cercare se realmente la diminuzione apportata dall'urto nei volumi dei metalli messi a cimento, avesse seguita la ragione della quantità di calore sviluppato, ed ebbero i risultamenti che seguono.

Densità di un disco di argento	10,4667
— dello stesso ricotto	10,4465
— dello stesso battuto	10,4838
Densità di un disco di rame	8,8529
— dello stesso battuto	8,8898
— dello stesso battuto una 2ª volta	8,9081

Laonde prendendo ad unità il volume del metallo ricotto:

Quello dell'argento battuto era	0,9978
Quello del rame battuto una volta	0,9958
— — battuto due volte	0,9945.

Il rame dunque si era compresso più dell'argento, e la diminuzione di volume apportata dal 2° colpo era stata minore di quella prodotta dal primo. Lo sviluppo del calore è stato dunque conforme alla diminuzione del volume.

111. La pressione, l'urto svolgono calore nei solidi, nei liquidi e negli aeriformi. Lo strofinio agisce egualmente: il selvaggio sfregando l'un contro l'altro due pezzi di legno accende il fuoco, e sperienze dirette hanno dimostrato che lo strofinio dei fluidi sì liquidi che aeriformi contro dei solidi produce innalzamento di temperatura. In tutti questi risultamenti sperimentali l'azione meccanica si mostra come causa, di cui il calore sviluppato è l'effetto: or l'espressione numerica della relazione che passa tra questo effetto e la sua causa, costituisce l'*equivalente meccanico del calore*. Equivalente meccanico del calore.

Per la determinazione di questo equivalente Joule ha eseguito molte accurate sperienze: eccone alcune — In un recipiente di rame di misurata capacità egli spinse l'aria per mezzo di una tromba di compressione fino ad aumentarne la densità nel rapporto di 21,654 ad 1. Mentre quest'operazione si

menava ad effetto, il recipiente ed il corpo della tromba stavano immersi in una determinata massa di acqua, che pel fatto stesso dell'operazione accrebbe la sua temperatura di 0°,643F. Faceva d'uopo sceverare quella parte di calore dovuta al solo sfregamento dello stantuffo ; perciò lo si fece agire a voto in circostanze perfettamente simili e per egual numero di colpi , e l'acqua ambiente si riscaldò di 0°,297F. Per effetto dunque della sola compressione dell'aria l'incremento di temperatura non sarebbe stato che di 0°,346F. Calcolando su i dati dell'esperimento, si è trovato che la forza impiegata a far entrare nel recipiente di rame un volume di aria 21,654 volte più grande della sua capacità, era stata di 1552 chilogrammometri, ossia eguale a quella richiesta per innalzare 1552 chilogrammi all'altezza di un metro; e che nel consumo di questa forza si erano svolte 3437 unità di calore. Quindi a produrre lo sviluppo di una sola unità di calore si sarebbe richiesto l'impiego di 0,451 di chilogrammometro.

Un equivalente meccanico presso che eguale Joule ottenne sia pel calore prodotto dall'attrito delle ali di una ruota di legno contro l'acqua in cui pescava , sia per quello che si aveva dal ferro che strofinava contro del ferro e del mercurio, sia in fine per quello che si svolgeva nelle spire di un elettromagnete rotante incontro ai poli di una vigorosa calamita. L'equivalente meccanico del calore è dunque indipendente dal modo di eccitamento; e prendendo un valore medio di tutti quelli ottenuti da Joule , si può fissare eguale a 0,436 di chilogrammometro.

Se il lavoro meccanico delle forze è cagione di sviluppo di calore, questo viceversa può produrre meccanici effetti : ed a dimostrare questa proposizione basta il solo esempio della macchina a vapore. Ma se il fatto di questa macchina ci dichiara pienamente l'esistenza dell'effetto meccanico , non può darcene la misura, stante che la maggior parte del calore comunicato all'acqua della caldaia, rimane privo di effetto, perchè disperso dal vapore che sfugge dalla macchina.

La valutazione pertanto dell'effetto meccanico prodotto dal-

l'azione di un'unità di calore, può direttamente ottenersi dai noti valori del coefficiente di dilatazione dell'aria, della sua capacità termica a volume costante, di quella a pressione costante e del suo peso sotto l'unità di volume. Ed in vero immaginiamo che un litro di aria sia riscaldato da 0° a 272° conservando il suo volume: essendo $1^g,293$ il peso di un litro di aria alla temperatura 0° e sotto la pressione di $0^m,76$ di mercurio, e 0,1686 la sua capacità termica a volume costante, il numero delle calorie che acquisterà il litro di aria riscaldandosi da 0° a 272° sarà:

$$1,293 \times 0,1686 \times 272 = 59.$$

Poniamo ora che il litro di aria sia ancora riscaldato da 0° a 272° rimanendo sotto la pressione costante di $0^m,76$ di mercurio. Il numero delle calorie assorbite in questa seconda ipotesi sarà espresso da:

$$1,293 \times 0,2377 \times 272 = 83,6$$

la frazione 0,2377 rappresentando la capacità termica dell'aria a pressione costante. Or la differenza che sotto l'aspetto meccanico esiste tra la 1ª e 2ª di queste due ipotesi, si è che nella 1ª il volume dell'aria è restato lo stesso acquistando una tensione doppia, mentre nella 2ª la tensione è rimasta costante ed il volume si è duplicato. In conseguenza la differenza di:

$$83,6 - 59 = 24,5$$

unità di calore ha prodotto l'effetto meccanico della duplicazione del volume. E per calcolare questo effetto in chilogrammometri immaginiamo che un cilindro avente un decimetro quadrato di base e 2 decimetri di altezza, sia pieno di aria a 0° sotto la pressione di $0^m,76$ di mercurio, e che quest'aria sia riscaldata a 272°. Per questo aumento di temperatura metà dell'aria sarà uscita dal cilindro, ed ogni falda dell'altra metà avrà eseguito il lavoro meccanico d'innalzare ad un decimetro di altezza una colonna di mercurio di un decimetro quadrato

di base ed alta $0^m,76$. Or il peso di questa colonna, essendo 13,6 la densità del mercurio, è di chilogrammi:

$$0,76 \times 13,6 = 103,36\ ;$$

e questo peso elevato a $0^m,1$ di altezza rappresenta chilogrammometri 10,336, che sono l'effetto meccanico di 24,6 unità di calore. Quindi una sola unità di calore avrebbe prodotta la forza di chilogrammometri $\frac{10,336}{24,6} = 0,42$. E giova osservare che questo risultamento non dipende affatto dall'ipotesi dei 272 gradi di calore comunicato, come ognuno potrà assicurarsene rifacendo il calcolo per un aumento qualunque di temperatura.

Premesso questo risultamento, facciamoci a determinare se tutto il calore comunicato all' acqua di una caldaia a vapore, sia utilmente impiegato. Una macchina di un cavallo di forza, ossia della forza che bisogna per elevare in un secondo 75 chilogrammi all'altezza di un metro, farà in un'ora il lavoro meccanico di $75 \times 60^2 = 270000$ chilogrammometri, e per compiere questo si dovranno gassificare 15 chilogrammi di acqua, e consumare in conseguenza $15000 \times 540 = 8100000$ unità di calore: quindi una sola unità produrrà il lavoro di $\frac{27}{810} = \frac{1}{30}$ di chilogrammometro. Ma qui sopra abbiamo trovato 0,42 di chilogrammometro come effetto meccanico del consumo di un unità di calore; dunque il calore utilizzato da una macchina a vapore sta a quello comunicato all'acqua della sua caldaia, come $\frac{1}{30} : 0,42 = \frac{1}{13}$ circa.

Trasformazione delle forze meccaniche in calore e viceversa.

112. Nel n° precedente abbiamo veduto che un litro di aria a 0° e sotto la pressione di $0^m,76$ di mercurio per espandersi in un volume doppio deve consumare 24,6 unità di calore ed eseguire un lavoro meccanico pari a chilogrammometri 10,336. Poniamo ora che il volume dilatato ritorni a quel che era, sottoponendolo ad una pressione doppia di $0^m,76$, vale a dire comunicandogli una forza eguale a chilogrammo-

metri 10,336. Per effetto di questa compressione l'aria accrescerà la sua temperatura di 108°,5, come risulta dalla proporzione (n° 94):

$$x^{\circ} : 0^{\circ},3977 = 1 : 0,003665 ;$$

e con questo aumento di temperatura si troverà di aver acquistato un numero di calorie rappresentato dal prodotto dell'accrescimento termometrico per la massa del litro di aria e per la sua capacità termica a volume costante, ossia:

$$108,5 \times 1,293 \times 0,1686 = 23,67 ,$$

vale a dire lo stesso numero di calorie distrutte nella sua espansione. Laonde nell'espansione dell'aria vi è produzione di forza meccanica e perdita di calore, e viceversa il calore si produce con perdita di forza meccanica durante la compressione; o in altri termini, coll'espansione si trasforma il calore in forza meccanica, e colla compressione viceversa la forza meccanica si trasmuta in calore.

A viemeglio rifermare questa illazione viene in acconcio il seguente sperimento di Joule. Questi prese due recipienti A e B di eguale capacità, compresse l'aria in A sino a 22 atmosfere e fece il voto in B; indi immerse i recipienti in due eguali masse di acqua, e poi li fece comunicare tra loro. L'aria allora si slanciò con forza da A in B, e quando l'equilibrio fu ristabilito la temperatura dell'acqua che circondava il recipiente A si trovò di tanto abbassata di quanto si era elevata quella dell'acqua in cui stava immerso il recipiente B. E giova notare che rifatto l'esperimento con immergere i due recipienti in una medesima acqua, questa non mostrò verun cangiamento di temperatura.

Or in questo fatto chiaramente apparisce come alla perdita di calore avvenuta nel recipiente A sia succeduta la forza meccanica che ha spinta l'aria da A in B, ed alla forza consumata per trasportare l'aria in B sia subentrato il calore che era sparito in A.

Questo concetto di trasformazione delle forze meccaniche

in calore e viceversa, apporta molta luce su i fenomeni dell'urto. Due corpi perfettamente inelastici, che corressero l'uno contro l'altro con eguali quantità di moto, si ridurrebbero al riposo. Sarebbe questo un caso, in cui il principio della conservazione delle forze, chiaramente indicato dall' insieme dei fatti naturali, si troverebbe in difetto, se dalle considerazioni precedenti non fossimo condotti a dover riguardare come trasformata in calore dalla mutua compressione dei due corpi quella forza meccanica che si è distrutta nell'urto.

Ponendo al contrario che l'urto, come sopra l'abbiamo supposto, avvenisse tra corpi perfettamente elastici, allora com'è noto (n° 67) non si avrebbe che uno scambio di forze; ma nel tempo stesso non vi sarebbe alcuna produzione di calore, poichè quello estrinsecato nella compressione sparirebbe nella susseguente espansione.

Or in natura non vi ha corpi perfettamente elastici nè perfettamente inelastici, e perciò nell'urto vi sarà sempre trasformazione più o meno grande, ma giammai totale, di forza meccanica in equivalente calore. Quindi è che l' ipotesi di corpi perfettamente incompressibili, e che in conseguenza urtandosi produrrebbero distruzione di forza meccanica senza sviluppo di equivalente termico, è da rigettarsi come intrinsecamente falsa; e perciò non fia meraviglia che una tale ipotesi conduca nella Meccanica razionale ad assurdi risultamenti.

LIBRO QUARTO.

IDROSTATICA ED IDRODINAMICA.

CAPO PRIMO.

EQUILIBRIO DEI LIQUIDI.

113. Lo stato liquido dei corpi è definito da un' estrema mobilità molecolare, non disgiunta da un residuo di coesione lasciatovi dalla forza ripulsiva del calore. Superficie di livello.

Da questa estrema mobilità molecolare risulta primieramente che la superficie libera di un liquido in quiete, detta *superficie di livello,* dev'essere in ogni suo punto normale alla direzione della gravità; imperocchè se così non fosse, la quiete del liquido sarebbe impossibile, stante che la gravità avrebbe una componente tangenziale alla superficie di esso liquido, e che ne spingerebbe le molecole come fa dei gravi che poggiano sopra piani inclinati. Questa relazione della superficie di livello alla direzione della gravità, che l' immagine di un pendolo riflessa dalla superficie del mercurio ci ha presentata come un fatto (n° 31), ha dunque nella natura stessa dello stato liquido la sua ragione di esistenza.

114. Dalla stessa mobilità molecolare risulta ancora che ogni pressione fatta in un punto qualunque di una massa liquida, vi si dovrà diffondere egualmente in tutte le direzioni; ed a rendere sensibile questa proprietà dei liquidi, conosciuta sotto il nome di *principio di egual pressione*, serve l'apparecchio rappresentato dalla fig. 94. Si compone di un piccolo corpo di tromba che termina in una cavità sferica comunican- Principio di egual pressione.

te con parecchi tubi che vi sono impiantati a modo di raggi. Immergendo il globo nell'acqua e tirando su lo stantuffo, l'apparecchio si empirà di liquido che vi resterà dentro, anche quando sarà cavato dal bagno: allora si spinga in basso lo stantuffo, e si vedrà l'acqua zambillare da tutti i tubi.

Questo fatto purtuttavia non prova che la diffusione della spinta; la sua identità in tutti i sensi non potrà esser dimostrata con verun esperimento diretto, stante che dalla composizione della forza comunicata e della gravità del liquido si avrà una risultante varia secondo la direzione della forza impressa. Evvi però un modo indiretto ed assai rigoroso di provare l'esistenza del principio di egual pressione, ed è quello della realtà delle sue conseguenze, come vedremo qui appresso.

Pressione dei liquidi sulle pareti dei recipienti.

115. Supponiamo tre recipienti A,B,C (Fig. 99, 100, 101), i cui fondi siano piani ed orizzontali; e sia A un cilindro o prisma retto, B abbia l'apertura più larga del fondo, e C viceversa. Ponendo che i tre vasi sieno pieni di un liquido qualunque, cerchiamo secondo qual ragione saranno premuti i loro fondi.

Incominciando dal vase A, fingiamo che da tutti i punti della superficie di livello siano abbassate delle perpendicolari sul fondo. Posta la forma del vase, queste rette formeranno un sistema di parallele alla parete laterale che lo circoscrive; e dando a ciascuna perpendicolare la spessezza di una molecola, esse formeranno un sistema di colonne elementari, in cui potremo immaginar divisa l'intera massa liquida. E poichè ciascuna delle colonne elementari gravita sul fondo, così questo sopporterà il peso di tutta la massa liquida contenuta nel recipiente.

Passiamo ora al vase B. Da un punto *c* preso sul perimetro del fondo immaginiamo elevata la perpendicolare *cm*, che facendola scorrere parallelamente a se stessa per tutto il contorno del fondo, determinerà la colonna liquida *cmnd* che vi graviterà sopra non altrimenti che abbiamo veduto pel vase A. Quanto poi alla massa liquida ambiente la colonna centrale e rappresentata in sezione dai triangoli *dns*,*cmt*, essa non può

esercitarvi che una pressione parallela al fondo, stante che una pressione non può essere che normale alla superficie che la riceve. Laonde pel vase B egualmente che per A, il fondo soffre il peso di una colonna liquida che ha per base la sua superficie e per altezza quella del liquido sovrastante.

La stessa relazione regge ancora pel vase C, imperocchè immaginandolo traversato da un piano orizzontale *sv*, la pressione che la colonna elementare *bm* farà sulla sua base *m*, sarà trasmessa in *s* e da questo punto al piede *n* della *sn* perpendicolare al piano del fondo. Il punto *n* sarà dunque premuto come se vi gravitasse sopra una colonnetta liquida dell'altezza *zn* ; e potendosi dire altrettanto di ogni altro punto della base, egli è chiaro che questa sarà gravata come se vi poggiasse sopra un cilindro dello stesso liquido di eguale base ed alto quanto la superficie di livello.

Se dunque il principio di egual pressione è vero, quella che un liquido farà sopra un fondo piano ed orizzontale dovrà essere indipendente dalla forma del recipiente ; ciò che l' esperienza pienamente conferma per mezzo dell' apparecchio rappresentato dalla fig. 95. Si compone di un cilindro *ab*, il cui fondo mobile *c* vi è mantenuto per mezzo del filo *cd*, che passando per le gole delle girelle *d* ed *f* si attacca al piattello *g* carico di pesi; ed il cilindro nell'orlo superiore è poi provveduto di vite, per mezzo della quale vi si possono aggiungere dei vasi di diverse forme, come A,B,C, ma tutti della medesima altezza. Messovi da prima il vase A, si riempia di acqua finchè potrà esser sostenuta dal contrappeso formato dal piattello colla sua carica, e si prenda nota dell'altezza del liquido. Si ripeta lo stesso sperimento coi vasi B e C, e si troverà che l'acqua per far equilibrio al contrappeso non potrà superare il livello a cui s'innalzava nel vase A.

Passiamo ora a calcolare la pressione che un liquido esercita sopra una parete piana e non orizzontale del suo recipiente. Sia *ab* (Fig. 103) un elemento di questa parete, determinato da due sezioni parallele e verticali. La pressione che il liquido vi esercita, andrà crescendo dall'alto in basso, e per

un punto qualunque z di ab essa pel principio suesposto pareggerà il peso della sottilissima colonna liquida che vi poggia sopra ; dimodochè elevando dai diversi punti di ab delle perpendicolari eguali alle distanze di essi punti dalla superficie di livello, il triangolo abl che ne risulta, rappresenterà il volume liquido il cui peso pareggia la pressione fatta su ab. Or l'aia di questo triangolo essendo data da $ab \times \frac{1}{2} bl$, ed essendo $\frac{1}{2} bl$ eguale alla distanza del centro di gravità di ab dalla superficie di livello, potremo dire esser la pressione fatta sull'elemento ab, eguale al peso di un volume liquido che avesse ab per base e per altezza la distanza del centro di gravità di ab dalla superficie di livello. La stessa relazione regge ancora per l'intera parete, imperocchè dinotando con a_1, a_2, a_3, ecc., le lunghezze di tutti gli elementi di superficie paralleli ad ab, e con z_1, z_2, z_3, ecc., le distanze dei loro centri di gravità dal livello del liquido, la pressione che questo farà sull'intera parete sarà eguale al peso del volume liquido rappresentato dalla somma $a_1z_1 + a_2z_2 + a_3z_3 + \ldots$ Ma questa somma è la stessa cosa che il prodotto dell'aia della superficie bagnata per la distanza del suo centro di gravità dalla superficie di livello; dunque questo prodotto rappresenterà il volume liquido, il cui peso pareggia la pressione sofferta dall'intera parete.

La pressione che un liquido esercita su di una parete piana e comunque inclinata componendosi di pressioni elementari che sono altrettante forze parallele tutte dirette in un medesimo senso, dovrà necessariamente (n° 24) ridursi ad una sola risultante, la quale incontrerà la parete bagnata in un punto che si denomina *centro di pressione*. Se la parete è orizzontale, tutte le pressioni elementari saranno eguali ed il centro di pressione si confonderà col centro di gravità della parete ; ma se questa sia inclinata all'orizzonte, il centro di pressione dovrà esser più basso del centro di gravità, stante che allora le pressioni elementari saranno crescenti a misura che si rapporteranno a punti più lontani dalla superficie di livello.

Paradosso idrostatico. 116. La legge della pressione dei liquidi sulle pareti laterali dei loro recipienti ci fa comprendere la ragione di un fat-

to, a prima vista sì poco intelligibile che fu qualificato per *paradosso idrostatico*: la fig. 96 ci offre di che farcene un'idea. Sul fondo *ac* del recipiente che vi è disegnato, la pressione che vi farà un liquido, di cui sia pieno, sarà per le cose anzidette eguale al peso di un volume dello stesso liquido avente la base *ac* e l'altezza *am*; ed in conseguenza di tanto superiore a quello che realmente vi si contiene, di quanto è il peso del liquido che potrebbe capire nello spazio rappresentato in sezione dai rettangoli *bt* ed *su*. E poichè la bilancia non darebbe che il peso del recipiente e quello del liquido contenuto, così la differenza tra la pressione esercitata sul fondo *ac* e quella che pel suo mezzo si trasmetterebbe alla bilancia dev' essere prodotta dall'opposta pressione che il liquido esercita sulla parete *ho,sd*; pressione, che per la legge esposta nel n° precedente, risulta per lo appunto eguale all' indicata differenza. Quindi si comprende perchè gli apparecchi destinati a dichiarare la legge di pressione dei liquidi sulle basi orizzontali dei loro recipienti, debbono essere con fondo mobile.

117. Ed a provare che realmente i liquidi spingano dal basso in alto le pareti dei loro recipienti, quando sieno convenientemente situate, serve l' apparecchio rappresentato dalla fig. 98 e che va conosciuto sotto il nome di *mantice idrostatico*. Si compone di due tondi di legno congiunti da una zona di cuoio, che ne forma così una specie di mantice in cui si apre il tubo *d*. Caricato che sia il tondo superiore di un peso eguale a quello che avrebbe una colonna di acqua di medesima base e di altezza eguale a quella che si vorrà dare al liquido nel tubo *d*, si vedrà il tondo sollevarsi con tutta la sua carica, quando l'acqua versata nel mantice pel tubo *d* avrà superata quella data altezza. **Mantice idrostatico**

118. Uno dei fenomeni idrostatici che meglio riveli il principio di egual pressione, è quello delle enormi pressioni che si possono generare con piccola quantità di liquido. Poniamo, a modo di esempio, che all'orifizio di una botte (Fig. 97) sia fermato con mastice un tubo di $0^{m},01$ di diametro ed alto $2^{m},5$: la capacità interna del tubo sarà di circa 2 decilitri. **Torchio idraulico.**

Poniamo inoltre che i due fondi della botte abbiano 0^{m},8 di diametro, e quello della sezione media sia di 1^{m}: così avremo che l'estremità g del tubo si eleverà 3^{m} su i centri dei due fondi. Quando la sola botte sarà piena di acqua, la pressione che soffrirà ciascuno dei fondi ab,cd, sarà eguale al peso di un cilindro di acqua avente per base un cerchio di 0^{m},8 di diametro e 0^{m},5 di altezza; ma quando sarà pieno anche il tubo, allora il cilindro di acqua che in peso pareggerà la pressione su ciascuno dei fondi, avrà 3^{m} di altezza e quindi un peso 6 volte più grande del primo. Coll'addizione dunque di 2 decilitri di liquido si è potuta sestuplicare la pressione su i fondi; e così si comprende come con piccola quantità di acqua si possa sfondare una botte.

Sullo stesso principio è fondata la costruzione del torchio idraulico, rappresentato dalla fig. 108. Vi è un cilindro A di bronzo o di ferro fuso, chiuso in basso ed aperto in alto con una luce più stretta della sua sezione interna; ed a modo di stantuffo passa per quella luce il cilindro massiccio B sormontato dal piano C. Intorno ad un fulcro n è mobile la leva fh, destinata a mettere in azione lo stantuffo k della tromba l, la quale assorbe l'acqua dal recipiente G, e pel tubo m la spinge nel cilindro A. Così nell'interno di questo cilindro si genera una pressione che solleva lo stantuffo B, e con eguale energia spinge gli oggetti situati sul piano C contro l' altro piano solidamente fermato alle colonne D. Moltiplicando la forza impiegata all'estremo f della leva pel rapporto di nf alla distanza che separa l'asse dello stantuffo k dal fulcro n, e poi pel rapporto dell'area di sezione dello stantuffo B a quella dello stantuffo k, si avrà la ragione della pressione prodotta alla forza impiegata. È facile comprendere come questa ragione possa acquistare un valore considerevole, e come l'industria abbia saputo trarne profitto per le operazioni che richieggono l'azione continuata di un'enorme pressione.

Ruote a reazione.

119. Un vase A (Fig. 104) pieno di acqua e poggiato sopra una tavoletta di sughero perchè possa galleggiare sopra una massa dello stesso liquido, non mostra tendenza a scorrere per

qualsiasi direzione sulla superficie del liquido; e da ciò si rileva che le componenti orizzontali delle pressioni che un liquido esercita sulle opposte pareti del suo recipiente sono eguali tra loro. Or poniamo che sulla parete *c* del recipiente siasi scolpito un foro, ed a questo sia applicata una cannella con chiave: finchè questa sarà chiusa, il recipiente resterà in quiete; ma una volta che sarà aperta vedremo il recipiente muoversi in direzione opposta a quella del getto liquido. Questo moto è prodotto dalla pressione che mancata sopra una parte della parete *c*, ha resa preponderante l' altra che agisce sulla parete opposta.

Su questo principio son costituite le così dette *ruote a reazione*. Immaginiamo un recipiente A (Fig. 122) comunicante con un tubo B mobile intorno al suo asse, ed al quale ne sieno impiantati orizzontalmente due altri, *c* e *d*, che abbiano laterali ed opposte aperture. Versando dell'acqua nel recipiente A, il liquido scenderà pel tubo B, e poi fluendo per gli orifizii dei tubi *c* e *d* spingerà la leva *cd* a rotare insieme col tubo B, come indicano le frecce segnate nella figura. Ritenendo il principio, ma ordinando la costruzione della macchina al miglior effetto utile, l'industria ha saputo trarne profitto impiegandola come mezzo motore di alcuni mulini.

120. Siano A e B (Fig. 109) due vasi di qualunque grandezza e figura, messi in comunicazione per mezzo del tubo C: supponiamo che nei due vasi sia versato uno stesso liquido e cerchiamo la sua condizione di equilibrio. Immaginando fatta la sezione *mn* in un luogo qualunque del tubo di comunicazione, che supponiamo orizzontale, è chiaro che il liquido sarà in equilibrio, quando le pressioni fatte su *mn* in opposte direzioni dalle masse fluide contenute in A e B, saranno eguali tra loro. Or chiamando a l'area della sezione *mn*, z e z' le distanze del suo centro di gravità (n° 116) dalle superficie di livello in A e B, e π la densità del liquido; questo starà in equilibrio quando sarà soddisfatta l'equazione $\pi a z = \pi a z'$, da cui risulta $z = z'$. Vale a dire che le due superficie di livello dovranno stare ad eguale distanza dal centro di gravità della Tubi comunicanti.

sezione *mn*, e quindi si confonderanno in un medesimo piano orizzontale.

Che se poi i due liquidi fossero eterogenei, allora l' equazione della loro condizione di equilibrio diverrebbe $\pi az = \pi' az'$; da cui risulterebbe la proporzione; $z : z' = \pi' : \pi$. Vale a dire che l'equilibrio di liquidi eterogenei in due vasi comunicanti richiede che le loro altezze siano inversamente proporzionali alle loro densità. Ciò pertanto suppone che la luce del tubo di comunicazione sia piccola abbastanza per impedire le correnti che i liquidi produrrebbero, quando avessero una densità assai diversa. Poniamo, a modo di esempio, che in A siasi versata dell'acqua ed in B del mercurio: se il tubo C non sia a sufficienza stretto, allora per la parte superiore della luce di communicazione passerà dell'acqua da A in B, e per la parte inferiore il mercurio scorrerà da B in A; dimodochè nell' equilibrio il mercurio occuperà il fondo dei due recipienti e l'acqua vi galleggerà sopra.

Equilibrio dei galleggiant. 121. Se dopo aver circoscritta col pensiero la parte A (Fig. 99) di una massa liquida in equilibrio, immaginiamo che il resto sia tolto via, la massa A allora dovrebbe cadere come ogni altro grave. Se dunque la massa A non cade quando giace in mezzo al suo stesso elemento, fa d'uopo dire che questo le oppone una forza eguale al suo peso. Ma se la massa che consideriamo, è spinta dal liquido ambiente dal basso in alto, lo è ancora dall'alto in basso; e perciò se chiamiamo H_1 la prima pressione, H_2 la seconda e P il peso della massa A, la sua quiete dimostra che debba esser soddisfatta l'equazione:

$$P = H_1 - H_2.$$

La differenza $H_1 - H_2$ costituisce la *spinta del liquido*.

Or immaginiamo tolta via la massa A, e messo in vece un solido che sia ad essa geometricamente eguale. Il peso del solido potrà essere eguale, maggiore o minore del peso P del liquido, di cui ha preso il luogo. Nel primo caso, supponendo che la densità del liquido sia costante, il solido rimarrà in equilibrio a qualunque profondità, perchè il suo peso si trove-

rà sempre eguale alla spinta $H_1 - H_2$. Nel secondo caso il solido scenderà sino al fondo del recipiente, perchè sollecitato da una forza eguale all'eccesso del suo peso sulla spinta del liquido; e viceversa salirà a galla nel terzo caso, per l'eccesso della spinta sul peso. In quest'ultimo caso il solido emergerà in parte dal liquido; e poichè il suo peso deve pareggiare quello del volume liquido discacciato, ne segue che se il solido sia fisicamente omogeneo, l'intero suo volume e la parte che ne rimane immersa saranno in ragione inversa delle densità del solido e del liquido.

Stringendo in un solo enunciato questi tre risultamenti, abbiamo il teorema di Archimede: *un solido, immerso in un liquido, vi perde tanto del suo peso, quanto è quello del volume liquido che ha scacciato.*

Quando il peso di un solido per uno stesso volume sia eguale o minore di quello di un dato liquido, allora il solido vi resterà sospeso o galleggiante, ed avrà quiete quando il suo centro di gravità e quello del liquido scacciato si troveranno sulla stessa verticale; imperocchè il peso del solido e l'opposta spinta del liquido sono verticalmente dirette ed applicate ai rispettivi centri di gravità. Ma sappiamo che vi sono tre diverse maniere di equilibrio (n° 35); e per trovare le condizioni per le quali un galleggiante debba prenderne una piuttosto che un'altra, noi cominceremo dal supporre il solido interamente immerso nel liquido, ossia che i due corpi sotto un medesimo volume abbiano lo stesso peso. Il solido potrà essere omogeneo o pure eterogeneo: nel primo caso, comunque il corpo si muova, il suo centro di gravità si confonderà sempre con quello del liquido scacciato, e perciò non avrà che equilibrio indifferente. Ma se sia eterogeneo, il suo centro di gravità potrà stare più basso di quello del liquido spostato, come per B (Fig. 113), e l'equilibrio sarà stabile; o più alto, come per C, e si avrà un equilibrio instabile.

122. Passiamo ora al caso in cui il solido, perchè specificamente più leggiero del liquido su cui insiste, non ne rimane immerso che per una parte soltanto del suo volume. In que- Metacentro.

sto caso l'equilibrio del solido potrà riuscire stabile, quantunque il suo centro di gravità sia superiore a quello del volume liquido scacciato. Ed in vero, poniamo per maggior semplicità che il solido sia omogeneo ed abbia la figura di paralleleppipedo rettangolare; e che nell'equilibrio (Fig. 110) i suoi spigoli maggiori siano paralleli alla superficie di livello: il suo centro *c* di gravità starà necessariamente più alto dell'omonimo centro *c'* del liquido spostato, ed i due centri staranno nel piano di simmetria *st*, normale alla superficie di livello.

Or immaginiamo il solido rimosso dalla sua posizione di equilibrio, ed inclinato sul liquido, come lo rappresenta la fig. 111. Allora la spinta del liquido applicata al centro di gravità *c'* del volume che il solido ne ha scacciato, ed il peso di esso solido, riunito nel suo centro di gravità *c*, formeranno una coppia, la quale svolgendosi ricondurrà il galleggiante alla prima posizione di equilibrio. Questo dunque è stabile nel caso rappresentato dalla fig. 110, quantunque il centro di gravità del galleggiante sia più alto di quello del volume liquido rimosso.

Ma se la posizione di equilibrio del galleggiante fosse stata quella indicata dalla fig. 112, allora la coppia generata nel passaggio del solido alla posizione rappresentata nella fig. 111, invece di ricondurlo al luogo di equilibrio, vieppiù ne lo avrebbe allontanato. L'equilibrio rappresentato dalla fig. 112 è dunque instabile.

Intanto si osservi che nella fig. 110 il piano di simmetria del solido, normale alla superficie di livello, è rappresentato da *st*; e che il punto d'incontro *z* di questo piano (Fig. 111) colla direzione della spinta del liquido, giace superiormente al centro di gravità *c* del solido. Al contrario nell'equilibrio rappresentato dalla fig. 112 il piano di simmetria del solido, normale alla superficie di livello, è *lm*, ed il suo incontro (Fig. 111) colla spinta del liquido avviene in un punto *z'* inferiore al centro di gravità *c* del solido.

Or il punto d'incontro della spinta del liquido col piano di simmetria del solido, che nell'equilibrio è normale alla superficie di livello, si denomina *metacentro*; ed in conseguenza di-

remo che l'*equilibrio di un galleggiante sarà stabile o instabile, secondo che il metacentro giacerà sopra o sotto al centro di gravità del galleggiante.*

CAPO SECONDO.

FENOMENI CAPILLARI.

123. Immergendo verticalmente nell'acqua dei tubi di vetro (Fig. 114) di piccol diametro, si vedrà il liquido elevarsi nei tubi ad un'altezza superiore al livello esterno, e tanto più grande per quanto il diametro del tubo è più piccolo. Si vedrà inoltre che la superficie di livello del liquido nell'interno del tubo non è piana, ma concava; e che all'esterno il liquido si eleva intorno al tubo formandovi un anello concavo. Descrizione.

Questo fenomeno avrà luogo con un liquido ed un tubo qualunque, purchè il liquido sia atto a bagnare la materia del tubo. Così l'acqua, l'alcool, l'etere, ecc. ascendono nei tubi di vetro; il mercurio si eleva nei tubi formati di metallo che possa amalgamarsi.

Si è osservato ancora che per tubi di uno stesso diametro la quantità di cui un liquido vi si eleva, dipende dalla sostanza del tubo, dalla natura del liquido e dal grado di temperatura; e che quando l'interno del tubo sia stato previamente bagnato col liquido in cui si vuole immergere, allora sparisce l'influenza della natura del tubo e non rimane che quella della natura del liquido e del grado di calore.

Ma se il liquido non sia atto a bagnare la materia del tubo, come avverrebbe immergendo dei tubi di vetro, di platino o di ferro nel mercurio, od anche dei tubi di vetro nell'acqua quando siano stati unti con qualche sostanza grassa; allora si vedrà — 1° il livello interno più basso dell'esterno; e la depressione sarà tanto più grande, per quanto il tubo sarà più

stretto — 2° che la superficie del livello interno è convessa, ed all'esterno il liquido si deprime intorno al tubo formando un quarto di anello convesso.

La speciale natura del tubo e quella del liquido, ed il diverso grado di calore influiscono sulla quantità della depressione non altrimenti che sulla quantità dell'innalzamento. E gioverà osservare che se il liquido cessa di ascendere quando per una qualche modificazione diviene incapace di bagnare la materia del tubo, così ancora cesserà di deprimersi se una qualche cagione venga a favorire la sua adesione al solido. Casbois osservava che il mercurio dopo aver bollito per molto tempo, non più si deprime in contatto del vetro; e Dulong fece conoscere che ciò dipendeva dall'ossido formato alla superficie del metallo e poi disciolto nel resto della massa.

Se due lamine parallele di vetro e separate da piccolo intervallo, sieno verticalmente immerse nell'acqua, si vedrà il liquido elevarsi tra esse ad un'altezza, metà di quella a cui sarebbe asceso in un tubo della stessa sostanza e di un diametro eguale all'intervallo delle lamine. La superficie del livello interiore si conformerà in un canaletto cilindrico; e con una simile curvatura il liquido s'innalzerà sulla faccia esterna delle lamine.

Ma se il sistema delle due lamine parallele fosse immerso nel mercurio, vale a dire in un liquido che non le bagna, allora vi sarebbe depressione interiore, pari alla metà di quella che avrebbe luogo in un tubo di diametro eguale alla distanza delle lamine; il livello interno avrebbe superficie convessa, ed una simile modificazione avverrebbe nel contatto delle lamine col livello esterno.

Tanto i fenomeni dei tubi che quelli delle lamine si potranno contemporaneamente riprodurre, adoperando un sistema formato di due tubi messi l'uno dentro dell'altro in modo d'avere un medesimo asse. Se il tubo interiore avrà un diametro eguale alla doppiezza dello spazio annulare che lo separa dal tubo esterno, si vedrà nell'intervallo dei due tubi un innalza-

mento o una depressione metà di quella avvenuta dentro al tubo interno, secondochè il liquido in cui il sistema verrà immerso, sarà o pur no capace di bagnarlo.

124. Osserviamo primieramente che in un dato tubo capillare un liquido divergendo tanto meno dal suo livello esterno, per quanto n'è maggiore la temperatura, ossia per quanto è minore la sua densità, si deve necessariamente escludere l'azione di qualsiasi forza premente come cagione dei fenomeni capillari, imperocchè l'effetto di una data pressione non potrebbe essere che inversamente proporzionale alla densità del liquido. Ed a confermare la realtà di questo concetto basta il solo fatto, che i fenomeni capillari si producono nel voto come sotto la pressione dell'atmosfera. Forze produttrici dei fenomeni capillari.

In secondo luogo osserviamo che i liquidi non si elevano nei tubi di piccol diametro, se non quando la materia del tubo è capace di esserne bagnata, e che l'innalzamento riesce indipendente dalla natura del tubo, quando di un velo dello stesso liquido ne sia stata già coverta la sua faccia interna. L'innalzamento capillare di un liquido è dunque un effetto complesso della coesione del liquido e della sua adesione alla materia del tubo. E per vedere come dalla ragione di grandezza di queste due forze dipenda che un liquido in contatto di un solido conservi il suo piano di livello, lo innalzi con una concavità o lo deprima in un dorso convesso, immaginiamo che *ab* (Fig. 117) rappresenti la faccia piana di un solido verticalmente immersa in un liquido, di cui *mn* indichi la superficie di livello; ed *m* sia una sua molecola situata in un punto della linea di contatto della superficie di livello colla faccia *ab*. Le molecole del solido che potranno agire sulla molecola liquida *m*, dovendo trovarsi in punti simmetricamente situati rispetto alla *ms* perpendicolare a *ab*, dovranno dare una risultante φ, diretta secondo la stessa *ms*; come d'altronde la risultante ψ delle attrazioni molecolari del liquido sulla stessa molecola *m* dovrà essere diretta secondo la *mo*, bisecante dell'angolo retto *bmn*. Quindi perchè la risultante di φ e ψ vada diretta secondo *mb*, o in altri termini perchè il liquido prolunghi il suo piano di

livello fino all'incontro del solido, è d'uopo (n° 17) che abbia luogo la proporzione:

$$\varphi : \psi = \text{sen}\, bmo : \text{sen}\, bms = \tfrac{1}{2}\sqrt{2} : 1.$$

Or se φ abbia con ψ una ragione più grande di quella di $\frac{1}{2}\sqrt{2}:1$, la loro risultante dovendo vieppiù avvicinarsi alla forza maggiore, cadrà nell'angolo *bms*; e poichè alla risultante dev' esser normale la superficie di livello nel punto *m*, così questa superficie avvicinandosi ad incontrare la faccia *ab* del solido, vi si eleva con una concavità: e la stessa superficie ivi scenderebbe viceversa con un dorso convesso, se la risultante di φ e ψ cadesse nell'angolo *bmo*, per essere la ragione delle due forze minore di quella di $\frac{1}{2}\sqrt{2}:1$. La concavità o convessità della superficie di livello di un liquido in un tubo capillare, dipende dunque dalla ragione che passa tra la forza di adesione del liquido alla parete del tubo e la forza di coesione dello stesso liquido.

Spiegazione di alcuni fenomeni.

125. È noto che i liquidi nei tubi capillari, che supponiamo sempre cilindrici ed a base circolare, vi si elevano, quando ne bagnano le pareti, ad altezze tanto più grandi, e tanto minore è il raggio di curvatura della concavità con cui finiscono, per quanto più piccolo è il diametro del tubo; e che secondo la stessa ragione si deprimono e cangiano la convessità del loro livello, quando non sono atti a bagnare la sostanza del tubo. Come questi rapporti derivino dall'azione di forze molecolari, non ci è dato di poter qui esaminare, stante che dovremmo di molto trascorrere i limiti di una semplice instituzione. Ci contentiamo perciò di riguardarli come dati sperimentali, e così facendo andiamo ad esaminare le relazioni ch'essi potranno avere con altri fatti congeneri.

A tal uopo immaginiamo che la colonna liquida sollevata nell'interno di un tubo capillare, comunichi inferiormente per mezzo di un canaletto orizzontale *m* (Fig. 115) con altra colonna dello stesso liquido, avente egual base e l'altezza del livello esterno. Nell'equilibrio del liquido le due colonne debbono egualmente gravitare sulle due luci del condotto *m*, e

perciò dovrebbero avere la stessa altezza, se niun' altra forza intervenisse. Ma la colonna che mette capo nel tubo è più alta dell' altra, e lo è tanto più per quanto è minore il raggio di curvatura della concavità con cui finisce; dunque l'azione producente quella concavità genera una forza traente dal basso in alto inversamente proporzionale al detto raggio di curvatura. E similmente troveremmo che l'azione producente la convessità terminale della colonna capillare genera una forza premente dall'alto in basso inversamente proporzionale al raggio di curvatura della convessità. Nella genesi di queste forze sta la ragione dei seguenti fatti.

— 1°. Introdotto in una massa di acqua un tubo capillare perfettamente bagnato nell'interno, e presa l'altezza a cui l'acqua vi si eleva sul livello esterno, si troverà che il tubo ne porterà interiormente sospesa una colonna due volte più lunga, quando sarà tratto fuori del liquido. Ciò dipende dalla convessità con cui finisce inferiormente la colonna sospesa nel tubo, e che aggiunge alla forza traente, generata dalla concavità superiore, un'egual pressione dal basso in alto. E per la stessa ragione avviene ancora che voltato il tubo a sifone, come indica la fig. 123, e fattavi entrar l'acqua a poco a poco, la si vedrà tenersi ad una medesima altezza nelle due braccia del tubo, finchè non sarà giunta all'estremità del braccio più corto. Ma appena l'avrà toccata, la concavità ivi esistente si trasformerà, per addizione di nuovo liquido, prima in un piano e poi in una convessità; la quale, quando avrà presa la sua massima curvatura produrrà nelle due braccia del sifone una differenza di livello doppia di quella, che avrebbe avuto luogo per immersione del tubo nell'acqua.

— 2°. In due piccoli tubi conici di vetro, che abbiano i loro assi orizzontali, s'introducano nell'uno (Fig. 120) una goccia di acqua per la base maggiore del tubo e nell'altro (Fig. 121) una goccia di mercurio per la base minore. Si troverà che le due gocce non rimarranno nei luoghi in cui si sono lasciate: la goccia di acqua camminerà verso la base minore del tubo, e quella di mercurio verso la base maggiore. Considerando le

curvature delle superficie libere delle due gocce, si comprenderà subito che il moto della goccia di acqua è determinato da un eccesso di trazione verso la base minore del tubo; e quello della goccia di mercurio da un eccesso di pressione verso la base maggiore.

— 3°. In una massa di acqua immergendo in direzioni parallele verticali ed a piccola distanza due lamine di vetro A e B (Fig. 118), osserveremo che esse tendono a riunirsi per le estremità superiori. Quest'attrazione non è che apparente: la forza che muove una lamina contro l'altra, provviene dalle componenti orizzontali *s* e *t* della forza aspirante della concavità AB che termina la falda liquida sollevata tra le due lamine, e che ad esse si trasmette per mezzo della coesione del liquido e della sua adesione al vetro.

Se le due lamine fossero similmente immerse nel mercurio, presenterebbero un'egual tendenza a riunirsi per le estremità superiori. Ma questa tendenza sarebbe puro effetto di pressione, stante che il livello esterno *mn* del mercurio sarebbe più elevato del livello interno *ceg*.

Poniamo ora che in uno stesso liquido s'immergano parallelamente due lamine, l'una capace di esserne bagnata e l'altra no; come rispetto all'acqua sarebbe il caso di una lamina di vetro e di una tavoletta incerata. Rappresenti A (Fig. 127) la tavoletta incerata e B la lamina di vetro: la superficie del livello interno si eleverà concava sulla lamina B e si deprimerà convessa verso A, presentando in *z* una linea d'inflessione, orizzontalmente parallela alle due lamine. Così la falda liquida che giace tra le lamine è tratta in alto per l'azione della concavità *zs*, e spinta in basso per effetto della convessità *zs'*; e pel contrasto di queste due forze il liquido si eleverà meno sulla faccia interna di B che sull'esterna, e viceversa starà più basso sulla faccia esterna di A che sull'interna. Vi sarà dunque un eccesso di pressione da dentro in fuori sulla lamina A, ed un eccesso di trazione anche da dentro in fuori muoverà la lamina B in opposta direzione. Quindi la loro ripulsione è risultante di due azioni, l'una idrostatica e l'altra molecolare.

Quest'analisi dell'attrazione e ripulsione delle lamine immerse nei liquidi ci fa comprendere la ragione degli analoghi movimenti dei galleggianti. Due palline vote di vetro galleggianti sull'acqua (Fig. 125) o due globetti di ferro sul mercurio (Fig. 126) si porteranno da loro stessi a mutuo contatto, quando sieno lasciati a piccola distanza; e resteranno aderenti in modo che l'uno di essi, quando sia tirato, si trasporterà l'altro appresso. Al contrario una pallina di cera ed un'altra di vetro (Fig. 124) galleggianti sull'acqua, mostreranno ripellersi a vicenda quando sieno meccanicamente avvicinate.

126. L'innalzamento dei liquidi nei tubi capillari può attuarsi sotto una forma che somministra novella pruova del principio di egual pressione. Ad un foro scolpito sul fondo di un bicchiere (Fig. 116) si adatti con mastice un sottilissimo tubo capillare; e tenendo il bicchiere capovolto, lo s'immerga nell'acqua finchè questa giunga a toccare la faccia interna del fondo. Il liquido allora si eleverà nell' interno del tubo fino ad una certa altezza, e quando questa sia stata raggiunta, si sollevi dolcemente il bicchiere: si vedrà il liquido mantenervisi al disopra del livello esterno, finchè il fondo non sia sollevato sull'acqua per quanto è l'altezza a cui il liquido ascendeva nell'interno del tubo. Ed ecco che quella forza capillare la quale sosteneva il peso della colonna liquida innalzata nel tubo, è venuta poi mercè la parziale emersione del bicchiere a sostenerne un peso migliaia di volte più grande. Novella pruova del principio di egual pressione.

CAPO TERZO.

EQUILIBRIO DEI GAS.

Invenzione del barometro.

127. Il principio di egual pressione, che regge la trasfusione delle forze in qualsiasi aggregato materiale, fu semplicemente intuito in alcuni casi particolari, prima che D'Alembert lo avesse nettamente formolato. Così la legge di equilibrio dei solidi nei liquidi, scoverta da Archimede, dimostra che nella mente dell'inventore stava una certa nozione dell'indicato principio; ed altrettanto deve dirsi di Lucrezio quando vedeva l'anologia che passa tra l'elevarsi di una fiamma nell'atmosfera ed il consimile movimento del sughero nell'acqua. Al contrario Aristotile, il quale conosceva esser l'aria un corpo pesante poichè aveva osservato che il peso di un otre si trova accresciuto dopo che l'otre è stato fortemente gonfiato, attribuì l'innalzamento dell'acqua nelle trombe aspiranti ad un preteso orrore della Natura pel voto, anzichè alla pressione atmosferica che n'è la vera cagione; e ciò perchè non vide come una pressione, fatta sopra un liquido d' alto in basso, si diffonda nella massa fluida anche da basso in alto. Questa intuizione l'ebbe il Torricelli, e la scienza si arricchì di una grande scoverta.

Degli esperimenti fatti da alcuni fontanieri fiorentini ne offrirono l'occasione. Fu trovato che l'acqua nelle trombe aspiranti non può salir oltre i 32 piedi; la qual cosa apertamente ripugnava col principio aristotelico, stante che l'orrore della Natura pel voto non può concepirsi che indefinito. Da questo limite osservato nell'ascensione dell'acqua Torricelli trasse argomento per attribuirla ad una cagione meccanica definita, ch'egli vide nella pressione dell'aria, e che verificò nel seguente modo. Cominciò dal considerare che se la pressione atmosferica fa equilibrio ad una colonna di acqua alta 32 piedi, deve

farlo ancora ad una colonna di mercurio che sia alta 28 pollici; imperocchè il mercurio è 13 volte e mezzo più pesante dell'acqua, e 28 pollici sono il quoziente di 32 piedi divisi per $13+\frac{1}{2}$. Quindi prese un tubo di vetro abbastanza lungo ed a fondo chiuso, lo empì esattamente di mercurio, e tenuto fermo l'orifizio con un dito, lo immerse capovolto in un bagno dello stesso metallo (Fig. 119): il mercurio si fermò realmente all'altezza di 28 pollici sul livello esterno, e Torricelli provò la soddisfazione di aver giustamente divinato.

La nuova di questa scoverta si sparse celeramente. Pochi ne restarono convinti; i più si tennero al principio aristotelico, spiegando i nuovi fatti per mezzo di effluvii che immaginavano usciti dall' acqua e dal mercurio. Pascal istesso prima di ammettere la nuova teoria, la volle sottoporre ad una pruova decisiva; egli fece trasportare il tubo torricelliano sul Puy-de-Dôme, ed il mercurio, come egli pretendeva, realmente si tenne più basso a misura che l'apparecchio fu trasportato più in alto. Nè tutto ciò deve recar meraviglia; il chimerico orrore della Natura pel voto aveva acquistata per opera della scuola tanta forza dommatica, che uomini come Galilei e Pascal potevano pensarvi senza muoversi a riso.

128. Il tubo torricelliano, sotto il nome di *barometro* (misuratore del peso), divenne bentosto un istrumento che si volle tenere continuamente allestito per vederne le indicazioni ogni volta che piaceva di farlo; ed il desiderio per questo genere di osservazioni vieppiù si accrebbe, quando dallo stesso inventore fu veduto che l'altezza della colonna mercuriale varia in un medesimo luogo a norma delle condizioni atmosferiche, mostrandosi più alta col buon tempo e scendendo all'avvicinarsi della pioggia. Diverse forme di barometri.

Per soddisfare a queste esigenze bisognò fermare il tubo ad una riga graduata per facilmente rilevare i cangiamenti di altezza della colonna mercuriale, e preservare il liquido della vaschetta da un contatto troppo libero coll'aria ambiente, affinchè la polvere e l'umidità non imbrattassero la faccia di livello. Furono perciò ideate diverse forme di barometro, ma

tutte si possono ridurre alle due specie principali dl *barometro a pozzetto* e *barometro a sifone*.

Una delle migliori forme di barometro a pozzetto è quella ideata da Fortin. Il pozzetto di questo barometro consiste in un cilindro *a* di cristallo (Fig. 138) fermato ad un recipiente di legno, e che ha per fondo una pelle flessibile onde poterlo elevare od abbassare per mezzo della vite *v*. Il tubo penetra nel mercurio del pozzetto con un'estremità acuminata, a fine di togliere ogni probabilità alla rientrata dell'aria; ed è chiuso in una canna metallica che ha due fenditure longitudinali, sopra una delle quali è segnata una scala in millimetri che ha lo zero in corrispondenza della punta *z* di uno stiletto di avorio fermato al fondo superiore del cilindro *a*. Volendo leggere sulla scala l'altezza barometrica, si comincerà dal portare per mezzo della vite *v* il piano di livello del pozzetto a contatto della punta *z*; indi si farà scorrere sulla canna metallica l'anello *e*, finchè gli orli superiori delle due opposte finestre, che vi sono scolpite, appariscano confusi in una linea sola tangente alla sommità della calotta con cui termina superiormente la colonna di mercurio.

La fig. 134 rappresenta un barometro a sifone secondo la modificazione recatavi da Gay-Lussac per farlo portatile nei viaggi. Il sifone componesi dei tubi *a* e *b* di uno stesso diametro, congiunti dal tubo capillare *c*, e sul braccio *a* si trova il forellino *m* pel passaggio dell'aria: il sifone è poi chiuso in una canna metallica, su cui sono mobili due anelli, l'uno destinato a misurare l'altezza della colonna nel braccio lungo, l'altro quella del braccio corto, e nella cui differenza sta l'equivalente della pressione atmosferica. Quando si vorrà trasportare questo barometro, si volgerà dolcemente finchè prenda la posizione indicata dalla fig. 135; così il mercurio si ridurrà tutto nel braccio lungo del sifone, e le oscillazioni che potrebbero produrvi le scosse del viaggio restano impedite dalla capillarità del tubo *c*.

Ad evitare che nel frequente rivolgere del tubo qualche bollicina di aria passasse da *a* in *b*, Bunten ha modificato il tu-

bo congiungente le due braccia del sifone, come si vede nella fig. 136. Verso la metà del tubo di congiunzione evvi un' espansione *k*, in cui la porzione superiore di quel tubo finisce assottigliata nella punta *c*, e che poi restringendosi costituisce la porzione inferiore *d* dello stesso tubo. Modificata così la congiunzione delle due braccia del sifone, egli è chiaro che ogni bollicina di aria che fosse spinta a passare da *a* in *b*, resterebbe chiusa nella cavità *e*.

Il barometro a sifone, quando le due braccia del tubo hanno realmente uno stesso diametro, ha il pregio di esser indipendente dall'azione capillare dello stesso tubo, imperocchè le pressioni generate dalle due convessità terminali della colonna di mercurio, a vicenda si elidono. Ha però lo svantaggio di esser poco sensibile, stante che su ciascun braccio del sifone non si può leggere che la metà della variazione accaduta nell'altezza della colonna barometrica. A toglier di mezzo questo difetto si è inventato il barometro a quadrante. L'intero apparecchio, secondo la costruzione di Jecker, è rappresentato dalla fig. 131; e dentro vi sta il meccanismo disegnato nella fig. 133. Sul mercurio che giace nel braccio *a* del sifone, evvi un piccolo galleggiante di ferro, unito alla sottile asta *b* dello stesso metallo; la quale con un lato a denti ingrana col rocchietto *c*, a cui è fermato l'indice *i* mobile sulla circonferenza di un cerchio diviso in parti eguali. Così ogni piccola variazione nell'altezza del mercurio contenuto nel braccio *a*, sarà dall'indice ingrandita nel rapporto del raggio del cerchio a quello del rocchetto.

Ma qualunque sia la forma che voglia darsi al barometro, è sempre necessario adoperar del mercurio puro d'ogni sostanza che potrebbe esservi disciolta, affinchè la sua densità sia funzione della sola temperatura. Sarà d'uopo ancora che quelle bollicine di aria che si mostrano aderenti al tubo quando si riempie di mercurio, e l'umidità quasi sempre attaccata al vetro, ne sieno espulse; che in contrario andrebbero a diffondersi nel voto barometrico, e terrebbero alquanta depressa la colonna mercuriale. Perciò i costruttori di barometri dopo

aver riempito il tubo di mercurio, lo fanno scorrere sopra una fiamma tenendolo inclinato coll'orifizio in alto, finchè il liquido non entri in ebollizione; stante che a quest' alta temperatura nè aria nè vapore potranno più esservi annidate. E quando il barometro è già costruito, si potrà facilmente conoscere se sia stato ben purgato di aria e vapore; basterà rivolgerlo lentamente finchè la sommità della colonna di mercurio non vada ad urtare contro il fondo del tubo, ed osservare se ne risulti un colpo vibrato o smorto; imperocchè nel primo caso l'urto è come tra due corpi duri, mentre nel secondo caso la sommità della colonna s'incontra con una soffice falda di sostanza gassosa.

Correzioni delle osservazioni barometriche

129. Perchè nell'altezza della colonna di mercurio si abbia un equivalente della pressione atmosferica, è d'uopo che le osservazioni barometriche sieno corrette degli effetti di quelle cagioni che possono alterare sia la densità ed il peso del mercurio, sia l'intervallo delle divisioni della scala. Or la densità del mercurio e l'assoluta lunghezza della scala sono varie secondo il grado di calore; quindi fa d'uopo ridurre le osservazioni ad una temperatura normale, ed all'obbietto si è scelto lo zero termometrico. E poichè le distanze del punto di osservazione dall' equatore e dal centro della terra debbono (ni 52 e 54) influire sul peso della colonna mercuriale, perciò si son prese come normali la latitudine di 45° ed il livello del mare. Laonde ogni osservazione barometrica vuol esser ridotta per mezzo del calcolo a quella che sarebbe stata, se fatta alla temperatura 0°, a livello del mare ed alla latitudine di 45°.

Se la colonna mercuriale occupa n divisioni della scala alla temperatura t^0, al grado 0° ne avrebbe occupato $n\frac{1+\alpha t}{1+\beta t}$, α indicando il coefficiente della dilatazione lineare della scala e β quello della dilatazione cubica del mercurio. Imperocchè sotto una data pressione dell'aria le altezze barometriche dovendo seguire la ragione inversa delle densità del mercurio, e le densità la inversa dei volumi, saranno le altezze in ragion diretta dei volumi; quindi chiamando 1 il volume del mercu-

rio a 0°, sarà $1+\beta t$ il suo volume a t^o, e perciò il numero n va ridotto nella ragione di $1:1+\beta t$; vale a dire che l'altezza della colonna a 0° sarebbe stata $n\frac{1}{1+\beta t}$. Ma il numero n è dato dalla scala, la quale passando da t^o a 0° si sarebbe contratta nella ragione di $1+\alpha t:1$, e quindi nella stessa ragione sarebbesi accresciuto il numero delle divisioni contenute in una data lunghezza; perciò all'espressione precedente fa d'uopo aggiungere il fattore $1+\alpha t$, e l'altezza barometrica a 0° sarebbe stata realmente $n\frac{1+\alpha t}{1+\beta t}$, che per brevità chiameremo n_1.

Quanto poi alla variazione di peso del mercurio osserviamo primieramente che dalle ricerche eseguite col pendolo in diversi punti della superficie terrestre risulta che se con g s'indichi la forza di gravità alla latitudine di 45°, il suo valore ad una latitudine qualunque λ dovrà essere espresso da $g(1-0{,}002566\cos 2\lambda)$. Ma l'altezza della colonna barometrica dev'essere in ragione inversa della gravità del mercurio; dunque il numero n_1 vorrà esser moltiplicato per $1-0{,}002566\cos 2\lambda$. Fatta questa seconda correzione al valore di n, indichiamolo con n_2.

Daltronde per la legge (n° 54) della ragione inversa dei quadrati delle distanze dal centro della terra si ha che indicando con g la forza di gravità a livello del mare, e con r il raggio terrestre, il valore della gravità ad un'altezza z sarà espressa da:

$$g\frac{r^2}{(r+z)^2}=g\frac{1}{\left(1+\frac{z}{r}\right)^2}.$$

E poichè z è sempre piccolissima rispetto a r, così trascurando i termini di ordine superiore al 1°, si avrà:

$\frac{1}{\left(1+\frac{z}{r}\right)^2}=\frac{1}{1+\frac{2z}{r}}$. Ma l'altezza n_2 deve variare inversamente

alla gravità del mercurio; dunque n_s dovrà esser moltiplicata per $\frac{1}{1+\frac{2z}{r}}=1-\frac{2z}{r}$, trascurando i termini di ordine superiore al 1°.

Finalmente osserviamo che la convessità terminale della colonna di mercurio producendo una forza cospirante alla gravità, l'altezza di quella colonna sarebbe stata maggiore se la suddetta forza non fosse intervenuta. Perciò chiamandone C l'equivalente in altezza di mercurio e riunendo tutte le correzioni, avremo che l'altezza barometrica n, osservata sotto la temperatura t^0, alla latitudine λ e per l'altezza z sul livello del mare, sarebbe stata per temperatura, latitudine e livello normali:

$$A=n\frac{1+\alpha t}{1+\beta t}(1-0{,}002566\cos 2\lambda)\left(1-\frac{2z}{r}\right)+C.$$

Barometro aneroide.

130. Nuovo modo di barometro è stato inventato dal Vidy, e perchè interamente solido, è distinto coll' aggiunto di *aneroide*, che vuol dire *senza liquido*. Questo barometro, oggi sostituito dal *barometro metallico* di Bourdon, consisteva in una scatola di metallo vota di aria, il cui coverchio flessibile incurvandosi più o meno sotto la varia pressione dell' atmosfera, comunicava il suo moto ad un indice per mezzo di apposito congegno. Alla scatola Bourdon ha sostituito un tubo schiacciato di ottone ABC (Fig. 137) voltato ad arco e fermato in B: il tubo è voto di aria, ed i suoi estremi A e C, mediante due fili metallici AE,DC mantenuti in leggiera tensione dalla spirale h, sono congiunti colla leva DE, fermata al braccio minore di una seconda leva, il cui braccio maggiore finisce nell'arco ik che si addentella ad un rocchetto che porta l'indice barometrico. Coll'aumentarsi della pressione atmosferica, l'arco ABC viene ad essere vieppiù incurvato; quindi gli estremi A e C si avvicinano, e la leva ED costretta perciò di girare a sinistra farà camminare nello stesso senso l'arco ik, il quale per l'opposto moto che genera nel rocchetto fa-

rà muovere l'indice da sinistra a destra; all'opposto se la pressione atmosferica viene a diminuire, l'arco ABC sarà meno inflesso, gli estremi A e C diverranno più lontani e l'indice moverà a sinistra.

La scala graduata che si osserva sul quadrante di simili barometri, non ha potuto essere altrimenti segnata se non per mezzo di comparazione ad un buon barometro a mercurio. Con tutto ciò le indicazioni di un aneroide saranno sempre incerte e per l'influenza della temperatura sulla resistenza del metallo alla pressione esterna, e per la perdita che il moto soffre trasfondendosi dagli estremi del tubo all'indice; quindi è che gli aneroidi, pregevoli per essere sommamente portatili, non sono da usarsi quando si va in cerca di misure esatte.

131. Stando alla definizione del chilogramma e ritenendo la densità del mercurio esser 13,6 più grande di quella dell'acqua, una colonna di mercurio alta $0^m,76$ (ossia 28 pollici) ed avente un metro quadrato di base, peserà chilogrammi: Influenza della pressione dell'aria sulla nostra vita.

$$13,6 \times 100 \times 7,6 = 10336.$$

Ma se ogni elemento della superficie del nostro corpo riceve dall'aria ambiente quella pressione che vi farebbe una colonna di mercurio di egual base ed alta $0^m,76$, la pressione totale dovrà pareggiare il peso di una colonna dello stesso liquido avente la medesima altezza $0^m,76$ e per base la intera superficie del nostro corpo. Or questa superficie si ritiene in valore medio per un metro quadrato e mezzo; quindi in valore medio ancora la pressione fatta dall'aria sul corpo umano sarà di una volta e mezzo 10336 chilogrammi, ossia di chil. 15504.

Questo risultamento, necessaria conseguenza di dati certissimi, fu non pertanto rigettato come impossibile da taluni che confondendo l'idea di pressione, la quale è sempre normale alla superficie che la riceve, con quella di peso che rappresenta una forza diretta dall'alto in basso, han creduto che l'enorme carica di 15504 chilogrammi dovesse tutta gravitarci su la testa e gli omeri. Ma non è a questo modo che si ha da in-

tendere la pressione che riceviamo dall'aria ambiente. Per farcene una giusta idea empiamo di mercurio un tubo, lungo 0m,76 e del diametro di circa 0m,005; chiudiamone l'orifizio colla palma di una mano, e con essa sostenendolo voltiamone il fondo in alto: sentiremo allora di non aver a sopportare un un gran peso. Or immaginiamo che ogni parte della superficie del nostro corpo, eguale in estensione all'orifizio del tubo, sia normalmente premuta da una simile colonna di mercurio; e nella somma dei pesi di queste colonne, che in tutte le direzioni, a due a due opposte, premono sull'intera superficie del corpo umano, si avranno i 15504 chilogrammi della pressione totale.

Questa pressione, che quantunque diffusa per l'intero corpo è tuttavia enorme, non è da noi sentita perchè continuamente sostenuta fin dal cominciamento del nostro essere nell'utero materno. Avvertiamo però, quando avvenga, la sua parziale deficienza in alcuni punti; così le ventose richiamano il sangue in una parte della pelle, rendendovi minore la pressione dell'aria; e nel capo seguente vedremo come la macchina pneumatica ce ne offra più valido argomento. Or se consideriamo da un lato l'effetto delle ventose, e dall'altro la speciale struttura delle vene, che destinate a ricondurre il sangue da tutti i punti del corpo al cuore e quindi ai polmoni per esservi ossigenato, sono intanto prive di forza per dargli moto e di tratto in tratto provvedute di valvole per impedirne il rigurgito; se consideriamo, io diceva, la ragione di questi due fatti, vedremo chiaramente come senza la continuata pressione dell'aria la circolazione del sangue sarebbe impossibile.

Nuova luce sull'ufficio fisiologico della pressione dell'aria ci è venuta dalle stupende ricerche dei fratelli Weber. Questi osservando che i muscoli, i quali uniscono gli arti al tronco, si trovano rilasciati quando gli arti stanno penzoloni, sospettarono che la testa dell'omero nella cavità della scapola e quella del femore nell' acetabolo dell' ischio vi fossero mantenute dalla pressione dell'aria; dimodochè gli arti non pesassero su i legami che li congiungono al tronco. Per verificare questo

concetto essi tagliarono sopra un cadavere tutto il molle che unisce la coscia al tronco non esclusa la membrana capsulare che chiude l' articolazione della testa del femore nel corrispondente acetabolo, e videro che l'arto quantunque penzolone non si staccava dal tronco. Allora con un piccolo succhiellò fecero dall' interno della pelvi un foro fino ad aprirsi nel fondo dell'acetabolo, e la coscia cadde nel medesimo istante in cui la punta del succhiello si affacciava nella cavità, vale a dire nel medesimo istante in cui l'aria dalla pelvi penetrava nell'acetabolo. Dopo ciò restituirono la testa del femore nella sua cavità tenendo chiusa con un dito l'apertura del foro nella pelvi; la coscia restò sospesa, ma cadde appena che fu tolto il dito. Identici risultamenti si ebbero da sperienze similmente istituite su gli arti superiori.

132. L'aria nella sua compressibilità presenta una notevole relazione tra il valore della forza da cui è premuta e la diminuzione del suo volume; relazione conosciuta sotto il nome di *legge di Mariotte* dal nome del suo scopritore. L' apparecchio rappresentato dalla fig. 139 serve a dichiararla. A e B sono due tubi di cristallo di egual diametro ; il primo è lungo almeno un metro ed è aperto superiormente, l'altro è lungo due decimetri circa e porta superiormente un coverchio a vite che può chiuderlo ermeticamente: i due tubi comunicano tra loro mediante il tubo C, e per mezzo del tubo D sono in comunicazione colla camera di tromba M. Quando l'apparecchio si vuol mettere in azione, si comincia dall'innalzare lo stantuffo N fin sopra il foro O, onde sia libera la via all'aria tra l'interno e l'esterno della camera; e tolto di mezzo il tubo A, si verserà pel condotto D tanto mercurio da riempire quasi la metà del cilindro M: indi si riporrà il tubo A nel suo posto, si toglierà il coverchio a B, e si farà scendere lo stantuffo N, finchè il mercurio non giunga a livello degli zeri delle scale incollate su i tubi A e B; rimettendo allora il coverchio a B, si è sicuro di avervi definito un volume di aria che ha la stessa densità dell'aria esterna. Dopo ciò si continuerà a far discendere lo stantuffo N, il quale spingendo egualmente il mercurio in

Legge di Mariotte.

A e B, non potrà fare che vi s' innalzi al medesimo livello, stante che in B fa d'uopo comprimer l'aria, che in A è semplicemente rimossa. Or quando sulla scala adattata a B si vedrà che per l'innalzamento del mercurio il volume di aria ivi contenuta si è ridotto a metà, allora leggasi l'altezza del mercurio in A; da quest'altezza si sottragga quella che ha in B; e l'eccesso, che rappresenta la forza aggiunta alla pressione atmosferica allora esistente, si compari all'altezza che segna il barometro: si troverà che le due altezze sono eguali. L'aria dunque contenuta in B si è ridotta a metà di volume sotto una pressione doppia; ed è facile comprendere come tra i limiti di lunghezza del tubo A si possano variare gli sperimenti per mettere in chiaro la legge:

Il volume di una data massa di aria è in ragione inversa della pressione a cui soggiace.

E poichè la densità di una data massa deve seguire la ragione inversa del suo volume, così la legge di Mariotte potrà ancora formolarsi nel seguente modo:

La densità di una data massa di aria è in ragion diretta della pressione che sopporta.

Questa legge, quantunque non verificata rispetto all'aria oltre a due o tre atmosfere, nè con sufficiente precisione, fu purtuttavia ricevuta come rigorosamente esatta, e si volle estesa a tutti i corpi aeriformi. Intanto Despretz trovava con esperimenti decisivi che fluidi elastici diversi sono inegualmente compressibili. Egli empiva di diversi gas due campanelle di cristallo A e B (Fig. 129) strozzate nel mezzo a fine di rendere più sensibile l' alterazione che andava a prodursi nei volumi dei gas che vi erano racchiusi: i due recipienti si facevano pescare in una vaschetta di mercurio, e con questa si chiudevano in un cilindro di cristallo pieno di acqua, sulla quale si agiva con una tromba premente. Ponendo in A dell'aria, e riempiendo B successivamente di gas acido solforoso, solfidrico, ammoniacale e cianogeno, Despretz trovava che sotto la stessa pressione tutti questi gas scemano di volume più che l'aria.

La legge di Mariotte non è dunque rigorosamente applicabile a fluidi elastici diversi dall'aria. Nè per quest'ultima è poi di rigore geometrico, quantunque Dulong ed Arago sperimentando fino a 27 atmosfere con un apparecchio analogo a quello della fig. 139 la giudicassero esatta; imperocchè il volume di aria contenuto nel tubo A diminuendo secondo la serie $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, ecc., le sue alterazioni divenivano tanto meno sensibili, ed in conseguenza tanto più influenti gli errori di lettura, per quanto più grandi erano le pressioni. Per la qual cosa il Regnault, fattosi a verificare la stessa legge, si adoperò in modo da conservare costante il volume dell'aria, mentre ne faceva variare la densità secondo la serie 1, 2, 3, ecc. Il suo apparecchio componevasi di un tubo verticale A (Fig. 150) di circa 8 millimetri di diametro e di 3 metri di lunghezza, che chiuso superiormente per mezzo del robinetto C ed inferiormente per mezzo del cilindro D di ferro fuso, comunicava da un lato col corpo di tromba H e dall'altro col tubo B assai lungo, destinato a contenere il mercurio che doveva comprimere il gas racchiuso nel tubo A. E su questo tubo erano inoltre segnati due punti, l'uno verso il basso, l'altro alla metà dell'intervallo che separava il primo punto dall'estremità superiore dello stesso tubo: il primo intervallo segnava il volume 1, il segno medio dava il volume $\frac{1}{2}$.

Ordinato così l'apparecchio, si riempiva di gas, ben disseccato e sotto la pressione di un'atmosfera, la parte del tubo A che abbiamo indicata con 1. Indi per mezzo della tromba H si faceva salire il mercurio fino a ridurre il gas al volume $\frac{1}{2}$: la pressione allora, stando alla legge di Mariotte, doveva essere di 2 atmosfere. Per mezzo del robinetto C si faceva entrare nuova quantità dello stesso gas nel tubo A fino ad occupare il volume 1 sotto la pressione di 2 atmosfere; poi si riduceva a $\frac{1}{2}$ per nuova spinta data al mercurio, e si aveva la pressione di 4 atmosfere; e così di seguito. Or dinotando con V_0 e P_0 il volume e la pressione iniziale, con V_1 e P_1, V_2 e P_2, ... V_n e P_n le stesse quantità dopo la 1^a, 2^a, ... n^{sima} riduzione, la legge di Mariotte richiedeva soddisfatte le proporzioni:

$$V_0 : V_1 : V_2 \dots : V_n = P_n : \dots : P_2 : P_1 : P_0 ;$$

donde: $$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = \frac{V_1 P_1}{V_2 P_2} = \dots = \frac{V_{n-1} P_{n-1}}{V_n P_n} = 1.$$

Regnault ha trovato in vece che questi rapporti nel fatto riescono maggiori di 1: ciò dimostra che i gas si comprimono più che non crescono le pressioni. La differenza è stata piccola ma valutabile per l'aria e l'azoto; ma l'acido carbonico ha dato $\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1,0076$ e $\frac{V_{12} P_{12}}{V_{13} P_{13}} = 1,0999$. In generale la compressibilità è stata crescente colla pressione, e tanto più pei gas capaci di liquefarsi: il solo idrogeno ha presentata in vece una compressibilità decrescente.

Stereometro di Say.

133. Una bella applicazione della legge di Mariotte è stata fatta dal capitan Say alla determinazione dei volumi dei corpi nello stato di polvere. Il suo apparecchio è stato modificato specialmente da Regnault in Francia e da Kopp in Germania; ma se così è divenuto più esatto, ha perduta presso che interamente la sua prima semplicità. Quale fu ideato dall'inventore lo stereometro di Say componevasi di un recipiente A (Fig. 128) di cristallo ad orlo smerigliato per poterlo chiudere ermeticamente per mezzo della lamina B della stessa sostanza; ed al fondo del recipiente era innestato il tubo C anche di cristallo e diviso in parti di eguale capacità. Supponiamo il tubo immerso nel mercurio del vase D fino allo zero delle divisioni, e che allora sia chiuso il recipiente colla lamina B; verrà così definito un volume V di aria sotto la pressione dell'atmosfera. Or se l'apparecchio si elevi alquanto, l'aria interna espandendosi scemerà di tensione; quindi il mercurio scendendo di un certo numero v di divisioni sotto lo zero, resterà tuttavia nel tubo ad una certa altezza p sul livello esterno. Chiamando P l'altezza barometrica nel momento dell'esperienza la legge di Mariotte ci darà la proporzione:

$$V + v : V = P : P - p ,$$

dalla quale avremo la capacità V dell'apparecchio fino all'origine delle divisioni del tubo.

Fatto ciò, si ponga nel recipiente A il corpo di cui si vuol conoscere il volume x; s'immerga il tubo fino all'origine delle divisioni, e si applichi la lamina B. Rimarrà così chiuso un volume $V-x$ di aria sotto la pressione P dell'atmosfera, e che diverrà $V-x+v_1$, quando per innalzamento del tubo il mercurio scenderà in esso di v_1 divisioni sotto lo zero, tenendosi all'altezza p_1 sul livello esterno: avremo quindi per mezzo della stessa legge di Mariotte la proporzione:

$$V-x+v_1 : V-x = P : P-p_1 ;$$

donde si potrà dedurre il volume x del corpo introdotto nel recipiente A.

134. L'esperimento sul Puy-de-Dôme (n° 127) fece concepire a Pascal l'idea che le altezze dei monti si potessero misurare per mezzo di osservazioni barometriche: la legge di Mariotte somministrò il mezzo di attuarla. Immaginiamo che una colonna di aria AB (Fig. 130) estesa dal livello del mare al limite superiore dell'atmosfera, sia divisa in falde orizzontali Bb, ad, cf, ecc., tutte della stessa altezza; e dinotiamo con p_0, p_1, p_2, p_3, ecc., le pressioni che la colonna esercita su i piani Bg, ab, cd, ef, ecc. Ponendo che in tutta l'estensione della colonna la temperatura sia la stessa, avremo che le densità d_0, d_1, d_2, ecc., delle falde Bb, ab, cf, ecc., saranno proporzionali alle pressioni p_1, p_2, p_3, ecc., da cui son gravate, e perciò avremo le proporzioni: Livellazione barometrica.

$$d_0 : d_1 : d_2 : \ldots = p_1 : p_2 : p_3 : \ldots$$

Ma i volumi delle falde essendo eguali, le densità $d_0, d_1, d_2, \ldots$ dovranno essere direttamente proporzionali ai pesi p_0-p_1, p_1-p_2, $p_2-p_3, \ldots$ delle corrispondenti falde, quindi sostituendo questi pesi alle rispettive densità nelle proporzioni precedenti, si avranno le altre:

$$p_1 : p_2 : p_3 : \ldots = p_0-p_1 : p_1-p_2 : p-p_3 : \ldots ;$$

da cui risultano le equazioni:

$$p_0 p_2 = p_1^2 \,,\; p_1 p_3 = p_2^2 \,, \ldots$$

e quindi la progressione geometrica:

$$\div\!\!\div p_0 : p_1 : p_2 : p_3 : \ldots$$

Vale a dire che se l'aria, dal suolo al suo limite superiore, avesse una stessa temperatura, allora per altezze crescenti in progressione aritmetica le pressioni o altezze barometriche, e quindi le densità delle rispettive falde di aria, formerebbero una progressione geometrica decrescente.

In questo teorema dovuto al celebre Halley si ebbe il principio della misura delle altezze per mezzo delle osservazioni barometriche. Ed in vero dinotando con:

$$\div\, 0 \,.\, \alpha \,.\, 2\alpha \,.\, 3\alpha \ldots n\alpha$$

la serie delle distanze dal suolo crescenti in progressione aritmetica, e ponendo la progressione geometrica delle altezze barometriche sotto la forma:

$$\div\!\!\div 1 : \frac{p_1}{p_0} : \frac{p_2}{p_0} : \frac{p_3}{p_0} : \ldots\ldots \frac{p_n}{p_0} \,,$$

ossia: $$\div\!\!\div 1 : \frac{p_1}{p_0} : \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^2 : \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^3 : \ldots . \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^n ,$$

è chiaro che se fosse noto l'esponente x da darsi alla ragione $\frac{p_1}{p_0}$, perchè il termine risultante pareggiasse l'altezza barometrica a osservata ad una certa distanza dal livello del mare, questa distanza sarebbe espressa da αx. Or dall'equazione:

$$a = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^x$$

si ha: $$\log a = x(\log p_1 - \log p_0) ,$$

donde: $$x = -\frac{\log a}{\log p_0 - \log p_1} .$$

Similmente per una distanza più grande x' corrispondente all'altezza barometrica a' si avrà:

$$x' = -\frac{\log a'}{\log p_0 - \log p_1};$$

quindi: $$x' - x = \frac{\log a - \log a'}{\log p_0 - \log p_1}.$$

Quest'equazione rappresenta la differenza di livello $x' - x$ dei due luoghi di osservazione prendendo a come unità di lunghezza, e ponendo che la colonna di aria interposta ai due piani di livello avesse una temperatura uniforme. Scegliendo in vece per unità di lunghezza il metro e tenendo conto del diverso grado di calore nelle due stazioni, si è trovato che la distanza verticale z tra due punti a cui corrispondano le temperature t e t' e le altezze barometriche a ed a', sarà data (supponendo a' ridotta col calcolo alla temperatura di a) dall'equazione:

$$z = 18393^m \left[1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right] \log \frac{a}{a'}.$$

Se l'altezza non eccedesse 1000 metri, potrebbesi far uso della formola più semplice data da Babinet:

$$z = 16000^m \left[1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right] \frac{a-a'}{a+a'}.$$

Queste due formole tuttavia suppongono che la latitudine dei due punti non sia molto diversa da 45°. Se ciò non fosse, bisognerebbe aggiungere al 2° membro il fattore: $1 + 0,002566 \cos 2\lambda$, λ indicando la latitudine dei punti di osservazione.

135. Se più liquidi, non aventi tra essi azione chimica, siano versati in uno stesso recipiente, prenderanno equilibrio stabile, quando si troveranno ordinati a suoli orizzontali in modo che le loro densità formino una serie decrescente dal basso in alto. Andremmo assai lungi dal vero, se per sola analogia di fluidità volessimo applicare la stessa legge ai corpi aeriformi. Per definirne il modo di equilibrio, Berthollet pre- *Equilibrio nelle mescolanze dei gas.*

se due globi di vetro che finivano in tubi da potersi avvitare l'uno sull'altro, e provveduti di chiavette per chiuderli od aprirli a piacere dell'osservatore. Egli empì un globo d'idrogeno l'altro di gas acido carbonico, e dopo averli chiusi li depose nelle cave sottoposte all'Osservatorio di Parigi, affinchè restassero in uno spazio di temperatura costante; e quando stimò che l'equilibrio termico fosse già stabilito, pose il globo coll'idrogeno in alto, l'altro in basso; ne congiunse i tubi ed aprì le chiavi di comunicazione. Così l'idrogeno si trovò a contatto dell'acido carbonico; e fattosi dopo alcune ore ad analizzare il contenuto di ogni globo, egli rinvenne che l'idrogeno e l'acido carbonico, non ostante che la densità del primo sia presso che 22 volte minore di quella del secondo, si erano perfettamente mescolati insieme. Da ciò si comprende come l'aria atmosferica, ch'è una semplice mescolanza di ossigeno ed azoto, abbia presentata, ovunque raccolta, una ragione costante tra i due gas componenti.

E questa tendenza dei gas a vicendevole compenetrazione non lascia di aver luogo anche attraverso dei corpi porosi. Graham empiva di un gas qualunque una campana che poneva sull'acqua o sul mercurio, e che aveva superiormente un foro chiuso con gesso impastato al momento stesso dell'esperimento: dopo qualche tempo egli cercava con reagenti chimici se la campana contenesse ancora del gas che vi aveva introdotto, e non rinveniva che aria atmosferica. Questo fatto non è che una conseguenza della legge di Berthollet, imperocchè la capacità della campana essendo un infinitesimo rispetto allo spazio atmosferico, infinitesima doveva essere la quantità di gas che doveva rimanervi, dopochè il corpo poroso lo aveva messo in comunicazione coll'aria ambiente.

Ma se il corpo poroso che separa i due gas, non sia permeabile che da un solo di essi, questo allora penetrerà nello spazio occupato dall'altro e ne accrescerà la tensione. Lo stesso Graham pose sotto una campana contenente acido carbonico e che stava sul mercurio, una vescica piena di aria e bagnata all'esterno; la vescica cominciò a gonfiarsi, e dopo alcu-

ne ore pervenne a tale aumento di volume che ne restò crepata. L'acqua, permeabile dall'acido carbonico assai più che dall'aria, faceva che il primo gas penetrasse nella vescica in ragione assai più grande di quella con cui l'aria poteva uscirne; quindi la densità del gas interno doveva riuscir crescente e con essa la tensione.

Penetrazione dei gas nei liquidi.

136. La continua ripulsione molecolare dei corpi aeriformi, da cui deriva la legge di Berthollet, li spinge a penetrare nei liquidi in quantità più o meno grande a norma della minore o maggiore resistenza che v'incontrano. E che questa penetrazione, impropriamente denominata *soluzione*, tenga ad una causa puramente meccanica, lo dimostrano le leggi da cui è retta. Ed in vero dalle ricerche di Henry di Manchester e di Dalton è risultato — 1° Che le quantità di un dato gas penetrate in un liquido sono proporzionali alle pressioni — 2° Che il gas resterà nel liquido finchè sarà premuto da un'atmosfera dello stesso gas e con una forza eguale a quella che ne ha prodotta la penetrazione: se la tensione del gas divenisse minore o che altro gas venisse a sostituirlo, una parte più o meno grande del gas assorbito andrebbe a sprigionarsi; quindi si comprende perchè i gas contenuti nelle acque minerali se ne svolgono, quando quelle acque vengono esposte all'aria libera — 3° Che la quantità di gas che può essere ricevuta da un liquido, è indipendente dalla natura e quantità dei gas che già vi sono penetrati.

Il rapporto del volume del gas assorbito a quello del liquido che lo contiene sotto la pressione di *un' atmosfera* dello stesso gas, ha ricevuto il nome di *coefficiente di assorbimento*. Così rispetto all'acqua il coefficiente dell'ossigeno è di $\frac{1}{15}$ e $\frac{1}{30}$ quello dell'azoto; vale a dire che in 30 pollici cubi di acqua vi penetreranno due pollici cubi di ossigeno ed un pollice di azoto sotto la pressione di un'atmosfera di ossigeno pel primo e di azoto pel secondo. Ma 100 parti di aria contengono 21 parti di ossigeno e 79 di azoto; dunque l' ossigeno produrrà 0,21 della pressione atmosferica, ed i rimanenti 0,79 saranno dovuti all'azoto. Quindi i due componenti dell'aria pe-

netreranno nell'acqua in ragion composta dei numeri che ne rappresentano le rispettive quantità, e dei loro coefficienti di assorbimento; e perciò dinotando con 100 la quantità di aria assorbita dall' acqua sotto la media pressione atmosferica, con x quella dell'ossigeno e con $100-x$ quella dell'azoto, si avrà:

$$x:100-x=\frac{21}{15}:\frac{79}{30}=42:79\,;$$

donde: $$x=34{,}71.$$

Dunque nell'aria assorbita dall'acqua l'ossigeno è all'azoto prossimamente come 35 a 65; e perciò nell'aria sovrastante a grande estensione di acqua la ragione dell' ossigeno all' azoto dovrà esser minore che in quella sovrastante alla terra, come il fatto ha rifermato.

Premesse le quali cose ci è facile risolvere il seguente problema — *Dato il volume* v *di un liquido ed il volume* w *di un gas che gli sta sopra, e dati ancora il coefficiente* a *di assorbimento e la pressione* p *del gas; determinare la pressione* x *esercitata dal gas, quando il suo volume* w *sarà divenuto* w' — Per la definizione stessa del coefficiente di assorbimento abbiamo che nel liquido si conterrà tal quantità di gas che se fosse ridotta alla densità del gas sovrastante avrebbe il volume av; e dalla legge poi dell'assorbimento proporzionale alla pressione risulta che il volume av del gas assorbito avrà sempre la stessa densità del gas esterno. Potremo in conseguenza far astrazione dal liquido, e riguardare $w+av$ e $w'+av$ come espressioni dei volumi che avrà una stessa quantità di gas sotto le pressioni p ed x, e che a norma della legge di Mariotte dovranno render soddisfatta la proporzione:

$$x:p=w+av:w'+av\,;$$

donde: $$x=p\frac{w+av}{w'+av}.$$

137. Il teorema di Archimede su i galleggianti dovendo reggere, sia liquido od aeriforme il fluido in cui un corpo venga immerso, dovrà esser vero anche rispetto all'aria; ed in conseguenza il peso di ogni corpo che sta nell'aria, è realmente diminuito di quanto è quello del volume fluido che discaccia. Or da sperimenti appositamente eseguiti da Biot ed Arago si è rilevato che un litro di aria perfettamente secca pesa $1^g,2991$ per la latitudine di 45°, alla temperatura 0°, a livello del mare e sotto la pressione di $0^m,76$ di mercurio. Ma questa pressione divenendo: Perdita di peso di un corpo nell'aria.

$$0^m,76(1-0,002566\cos 2\lambda)\left(1-\frac{2z}{r}\right)$$

alla latitudine λ ed all'altezza z sul livello del mare, ed un volume V di aria alla temperatura t divenendo $\frac{V}{1+at}$ alla temperatura 0°; ne segue che V litri di aria che abbiano il grado di calore t, che si trovino sotto la pressione barometrica a ed all'altezza z in un luogo situato alla latitudine λ, peseranno:

$$V.1^g,2991\frac{a}{0^m,76}\cdot\frac{1-0,002566\cos 2\lambda}{1+at}\left(1-\frac{2z}{r}\right).$$

Tutto ciò suppone che l'aria sia perfettamente secca, la qual cosa giammai si verifica naturalmente; perciò la formola ha bisogno di un nuovo elemento che si riferisca alla diversa umidità dell'aria, e che faremo conoscere a suo luogo.

138. È così piccola la compressibilità dei liquidi, che eccetto il caso di enormi pressioni, noi possiamo senza errore sensibile riguardarli come incompressibili. Quindi è che se un liquido abbia una stessa temperatura in tutta la sua massa, dovrà aver ancora una densità costante; e perciò se un solido che vi s'immerge non lo pareggia in densità in un punto qualunque della massa, non lo pareggerà in verun altro punto, e sarà in conseguenza costretto a scendere fino a toccare il fondo del recipiente, ovvero a salire finchè non venga a galleggiare sulla superficie di livello. Ma per l'aria, che conforme- Palloni aerostatici.

mente alla legge di Mariotte deve presentare una densità decrescente dalle infime alle supreme regioni dell'atmosfera, la cosa va diversamente: tal corpo, che vi si eleva perchè più leggiero delle falde fluide che immediatamente lo circondano, cesserà poi d' innalzarsi quando avrà incontrato uno strato di densità pari alla sua. E se le alterazioni che i cangiamenti di temperatura apportano nella densità, non riescano eguali nei due corpi, l'altezza che rende possibile il loro equilibrio, dovrà necessariamente risultar diversa. Così nei luoghi in cui la nebbia è frequente, la si osserva toccare il suolo nelle prime ore del mattino, elevarsi circa il mezzogiorno sotto forma di nube, e poi ricadere col crepuscolo della sera.

L'innalzamento dei palloni aerostatici non avviene che in conseguenza di questi principii. Montgolfier fu il primo ad innalzarne nel 1782; e veruna scoverta eccitò giammai tanto entusiasmo e fè concepire sì grandi speranze. Sul principio non furono che sacchi di tela foderati di carta, e quando si ebbe la certezza della loro prodigiosa forza ascensionale e si pensò farli servire ad esplorare le incognite regioni dell'atmosfera, si diede loro una forma sferoidale. Pilatre de Rosiers fu il primo aeronauta, e non tardò ad esserne la prima vittima.

I mongolfieri, quali li vediamo nelle feste popolari, ascendono perchè l'aria vi è rarefatta dall'azione di una fiamma. Oltre al pericolo che l'aeronauta correrebbe di veder bruciare il pallone da un momento all'altro, egli non potrebbe elevarsi a grande altezza, stante che per le correnti che si stabiliscono alla bocca stessa del pallone, la temperatura dell'aria interna non può di molto innalzarsi. Perciò Charles pensò sostituire il gas idrogeno all'aria rarefatta; ed il taffetà gommato alla carta: così il pallone divenne meglio resistente, ed accrebbe la sua forza di ascensione, essendo l' idrogeno circa 15 volte più leggiero dell'aria. Ma se bastava moderare l'azione della fiamma perchè un mongolfiero fosse disceso, per fare altrettanto coi palloni a gas, fu d'uopo provvederli di una specie di valvoletta che aprendosi a piacere dell'areonauta, accrescesse il peso del pallone coll'introduzione dell'aria.

A questi palloni suole aggiungersi un *paracaduta*, la cui prima idea pare dovuta al celebre aeronauta Blanchard. Il paracaduta è come una grande ombrella, alla cui circonferenza è sospeso un grosso paniere che serve di barchetta all'aeronauta (Fig. 140). Finchè il paracaduta sta unito al pallone, rimane chiuso allo stesso modo di un'ombrella ; ma se mai ne fosse separato o cadesse insieme al pallone, allora urtando l'aria si aprirebbe come indica la fig. 142, e presentando una grande superficie al mezzo resistente, ne diverrebbe assai lenta la sua caduta. Un esperimento di questo genere fu eseguito a Londra nel 1802 : un francese, Garnerin, elevatosi in un pallone a considerevole altezza, ebbe il coraggio di affidarsi al solo paracaduta tagliando la corda che lo univa al pallone ; la discesa fu celere sul principio, ma apertosi bentosto il paracaduta essa divenne abbastanza lenta perchè l'areonauta potesse giungere sano e salvo a terra.

CAPO QUARTO.

DESCRIZIONE DI ALCUNI APPARECCHI AEROSTATICI.

Macchina pneumatica.

139. Ottone di Guerrick, borgomastro di Magdeburgo, inventò la macchina pneumatica nel 1650. Successivamente perfezionata da Boyle, Hawksbée, e Babinet, oggi suol costruirsi qual si vede rappresentata nella fig. 146. Una campana A di cristallo, che forma il recipiente della macchina, poggia sopra un piano di vetro BC: in un punto medio *o* di questo piano prende origine un condotto, che dividendosi poi in due fa comunicare il recipiente A coi corpi di tromba M ed N. Con una leva *lg* fermata alla ruota dentata *z* la si fa girare ora a destra ora a sinistra, e così salgono e scendono a vicenda i due stantuffi *p* e *q*, che con questo movimento aspirano l'aria dal recipiente A.

Per dichiarare come ciò avvenga, facciamoci a considerare la costruzione di uno degli stantuffi, e sia *q*. Un bastoncino metallico *ts*, terminato in basso da un tronco di cono e che in alto presenta l'anello *v*, attraversa il corpo dello stantuffo, e vi è mobile a strofinio. Quando lo stantuffo sale, il cono *s* di poco si eleva sul foro ch'è destinato a chiudere, poichè l'asta *ts* è tosto fermata per mezzo dell'anello *v*; così l'apertura del tubo di comunicazione tra il recipiente ed il corpo di tromba è chiusa dal cono *s* appena lo stantuffo comincia a discendere; e l'aria aspirata dal recipiente nella salita dello stantuffo, rimanendo compressa tra la base di questo ed il fondo della camera di tromba, spinge la valvola *x* ed esce fuori. Quando uno degli stantuffi scende, l'altro sale ed aspira nuova quantità di aria dal recipiente; e la pressione dell'aria esterna che si oppone al moto dello stantuffo che sale, quasi che di altrettanto spinge quello che discende, imperocchè l'operatore non ha da vincere, oltre l'attrito, che la sola differenza di

pressione nell'interno delle due trombe. Prima che Hawksbée avesse inventato le macchine a due camere, gli sperimenti pneumatici divenivano laboriosi per la crescente resistenza dello stantuffo a misura che il voto progrediva.

Ad indicare il grado di rarefazione avvenuto nel recipiente, è destinato il così detto *provino*. Consiste in una specie di barometro a sifone con braccia eguali, lunghe una decina di pollici, e fermato sopra una tavoletta graduata. L'apparecchio è chiuso da una campanella di cristallo *k*, (Fig. 144) la quale per un foro scavato nel suo sostegno comunica colla campana e colle trombe. Così a misura che la rarefazione dell'aria diverrà più grande, mancherà la pressione nel braccio aperto del provino, ed il mercurio scenderà nel braccio chiuso che n'era prima ripieno; ma non potrà grammai toccare uno stesso livello nelle due braccia, perchè l'aria non può estrarsi tutta.

Le migliori macchine pneumatiche appena giungevano a far il voto fino a 2 millimetri di pressione, quando un ingegnoso meccanismo inventato da Babinet, diede mezzo di spingere più innanzi la rarefazione dell'aria. Là dove il condotto, che fa comunicare il recipiente colle trombe, si divide in due, evvi una chiave conica (Fig. 148) traversata da tre fori, l'uno scavato secondo l'asse *z* della chiave e che sta in continua comunicazione col recipiente; gli altri due, *c* e *c'*, che s'incontrano ad angolo retto, si aprono anche perpendicolarmente nel primo. Quando la chiave sta come l'indica la fig. 148, la macchina agisce come d'ordinario, stante che il foro *c'* forma parte del tubo di comunicazione, e *c* rimane chiuso. Ma se stando così siasi giunto a vedere il provino stazionario, vale a dire che l'aria interna alle trombe non ha tensione sufficiente a sollevare le valvole, allora si volterà la chiave di mezzo giro a dritta, ponendola come viene indicato dalla fig. 149, ed il recipiente non comunicherà più colla tromba B, ma con A soltanto; il canaletto *zmn*, che prima rimaneva chiuso, ora porrà in diretta comunicazione le due camere di tromba. A questo modo l'aria aspirata nella tromba A, e che compressa dallo stantuffo non ha forza d' innalzarne la valvola, sarà cacciata

pel canaletto *zmn* nella tromba B, donde non può tornare di nuovo in A, perchè la valvola *s* ne chiude il cammino, appena lo stantuffo di B comincia a discendere. Quindi è che continuando l'azione della macchina, l'aria sarà sempre, quantunque lentamente, aspirata dalla tromba A e da questa spinta nella tromba B, da cui sortirà fuori quando sarà stata abbastanza condensata per sollevare la valvola del corrispondente stantuffo.

Sperimenti pneumatici. 140. La macchina pneumatica è un apparecchio indispensabile ogni volta che si vuol conoscere l'influenza della pressione dell'aria su i fatti che si compiono in seno dell'atmosfera. Abbiamo avuto finora diverse occasioni di citarne i risultamenti; altre ne troveremo in seguito: intanto descriveremo alcuni sperimenti che serviranno a meglio dichiararne gli effetti.

— 1°. La fig. 141 rappresenta due emisferi cavi di ottone, che combaciono esattamente nelle loro basi, ed uno di essi ha un tubo a modo di piede che serve a fermarlo sul meato della macchina pneumatica. Dopo avervelo avvitato si faccia il voto, si chiuda la chiave di cui è provveduto il tubo di comunicazione, e si stacchi l'apparecchio dalla macchina; i due emisferi si troveranno fortemente aderenti. Guerrick attaccandovi, secondo le diverse dimensioni, ora otto ed ora dodici cavalli che tiravano in opposte direzioni, non li vide pertanto separarsi. Ma se li poniamo sotto il recipiente della macchina pneumatica, li vedremo staccarsi da loro stessi, appena la rarefazione avrà toccata un certo grado.

— 2°. Abbiamo veduto nel n° 33 per quale ragione Galilei attribuiva alla sola resistenza dell'aria la diversa celerità che si osserva nella caduta dei gravi; un esperimento pneumatico è venuto a rifermare questo concetto. Un tubo di cristallo di 3 a 4 pollici di diametro e lungo 5 a 6 piedi, è chiuso da un lato ermeticamente con un coverchio metallico, a cui è adattato un meccanismo atto a sostenere dei piccoli corpi e lasciarli poi cadere contemporaneamente quando si vuole; nell'altro estremo il tubo è spianato per farlo combaciare col piat-

to della macchina. Dopo avervelo collocato e messi un pezzo metallico ed un fiocchetto di lana su i rispettivi sostegni, si faccia il voto al massimo grado, e si lascino cadere i due corpi; si vedranno battere sul fondo in un medesimo istante. E se l'esperimento si ripeta più volte, lasciando ad ogni volta maggior residuo di aria, si troverà una differenza crescente fra le celerità con cui i due corpi cadranno.

— 3°. Quei corpi, che come il fumo ed il vapore, si elevano nell'atmosfera, ubbidiscono alla stessa legge che fa galleggiare il sughero sull'acqua ed il ferro sul mercurio. Quando fu conosciuta la pressione atmosferica, questa deduzione divenne necessaria: gli Accademici del Cimento la verificarono nel voto barometrico, ma la macchina pneumatica ne rese più facile la pruova. Messa una candela accesa sotto la campana pneumatica, si vedrà, facendo il voto, la fiamma farsi gradatamente più debole e bassa, e cader quasi dal lucignolo al momento di spegnersi.

— 4°. Per dimostrare che ogni corpo perde nell'aria una parte del suo peso, si prenda un globetto di ottone massiccio ed un globo di egual peso, ma formato di una sottile foglia dello stesso metallo, e si equilibrino ai due estremi di un piccolo giogo di bilancia. Messo questo apparecchio sotto la campana pneumatica, si vedrà la bilancia pendere dal lato del globo di maggior volume quando l'aria sarà stata abbastanza rarefatta.

— 5°. La continua ripulsione molecolare nei fluidi elastici è chiaramente dimostrata col seguente sperimento. Ponendo sotto la campana pneumatica una vescica compressa e poi strettamente chiusa nel collo, si vedrà gradatamente gonfiarsi a misura che mancherà la pressione esterna, e finalmente rompersi; e tutto ciò sarà prodotto dall'espansione di quella piccola quantità di aria che si conteneva nella vescica quando se n'è chiuso il collo.

— 6.° Ponendo sul piatto della macchina pneumatica, in vece della solita campana, un tubo cilindrico di ottone, di circa 3 pollici di diametro ed altrettanto di altezza, perfetta-

mente spianato nella base inferiore, e chiuso ermeticamente nella estremità superiore sia con un pezzo di vescica sia con una sottile lamina di vetro; facendovi il voto, la membrana o la lamina di vetro saranno rotte dalla pressione dell'aria. Chiudendo in vece il cilindro colla palma della mano, basteranno due o tre colpi di stantuffo per rendere assai sensibile l'effetto della pressione esterna.

Sifone. 141. Oltre la tromba aspirante, che ha data a Torricelli l'occasione di scovrire la pressione atmosferica, vi sono altri apparecchi la cui azione dipende dalla stessa causa meccanica; tali sono il *sifone*, il *vase di Mariotte*, la *fontana di Erone*, la *fontana intermittente*.

Il sifone non è che un tubo ricurvo *abc* (Fig. 145) a braccia ineguali; immergendo l'estremità del braccio corto in un recipiente pieno di liquido, ed aspirando pel braccio lungo finchè il liquido non lo riempia, lo si vedrà fluire per l'orifizio di questo braccio fino a quando l'estremità dell'altro resterà immersa nel liquido del recipiente.

Per dichiarare la ragione di questo efflusso, chiamiamo A l'altezza della colonna liquida equivalente alla pressione atmosferica, *a* l'altezza verticale del braccio *ab* del sifone, *a'* quella del braccio *bc*. Sarà $A-a$ l'altezza della colonna liquida che misurerà la pressione che da fuori in dentro agisce sull'orifizio del braccio corto, ed $A-a'$ quella corrispondente alla pressione similmente diretta sull'orifizio del braccio lungo. Ma $A-a$ è più grande di $A-a'$; dunque il liquido aspirato nel sifone sarà sottoposto ad una forza che continuamente lo preme nel senso *abc*. Dal che si rileva che $A-a$ dovrà esser maggiore di zero, affinchè il liquido possa per aspirazione entrare nel braccio lungo del sifone, e quindi aver luogo l'efflusso.

Vase di Mariotte. 142. Questo vase consiste in una boccia *ab* (Fig. 143) di vetro, chiusa dal turacciolo *c*, pel quale passa a strofinio il tubo *de*, e che ha verso il fondo un foro a cui è adattata la cannella *h*. La sua destinazione è quella di produrre un getto liquido di costante velocità, la qual cosa torna utilissima in molte ricerche fisiche.

A tal uopo, dopo aver riempito di acqua il vase, si farà rimanere l'estremità *e* del tubo alquanto più alta del foro; indi si aprirà la cannella. Allora, insieme al getto liquido, si vedrà sorgere dall'estremità *e* del tubo una serie di bollicine di aria, che elevandosi nella massa fluida vanno a riparare il voto che l'efflusso dalla cannella, facendo abbassare il livello *ll*, produce nello spazio *m*. Per questo voto avviene che tutta la massa fluida, che interiormente al vase sovrasta al piano di livello *ez*, sia sostenuta dalla pressione atmosferica e non possa in conseguenza spingere il liquido sottostante ad uscire per la cannella *h*. La velocità del getto sarà dunque dovuta alla pressione del solo liquido contenuto tra i piani orizzontali *ez* ed *ss*, e perciò sarà costante finchè il liquido non scenderà al di sotto di *ez*. Quindi si comprende come per mezzi di simili apparecchi De Laroche e Bérard nelle loro ricerche sulle capacità termiche abbiano potuto ottenere che i gas sottoposti ad esperimento corressero con moto uniforme pel serpentino di un calorimetro.

Ma se l'estremità del tubo si facesse arrivare ad un punto *e'* inferiore al livello *ss*, allora aprendo la cannella si vedrebbe il liquido rapidamente scendere nel tubo *de* fino allo stesso livello *ss*, ivi arrestarsi, e con esso il getto; il quale deve necessariamente cessare poichè il liquido è allora sostenuto dalla pressione atmosferica.

143. Questo apparecchio si compone di due recipienti A e B (Fig. 153) comunicanti per mezzo del tubo *ac*. Sul recipiente A poggia un bacino, dal cui fondo partono due tubi, l'uno *bd* lo pone in comunicazione col recipiente B, l'altro *ts* che lo fa comunicare con A, è provveduto dalla chiave *v* per aprire o chiudere una via all'esterno. Volendo allestire l'apparecchio, si toglierà via il tubo *ts*, e pel foro che lascia nel fondo del bacino, si verserà dell'acqua nel recipiente A fino a che non superi l'estremità *a* del tubo *ac*: allora si rimetterà il tubo *ts* al suo posto, e chiusa la chiave *v*, si verserà tant'acqua nel bacino da chiuderne la comunicazione con B. Quest'acqua per mezzo del tubo *bd* comprimerà l'aria contenuta in B e nella

Fontana di Erone.

parte superiore di A; e quest'aria compressa farà zambillare pel tubo *st* l'acqua contenuta in A, quando la chiave *v* sarà aperta. E poichè l'acqua ch'esce di A, si raccoglie in B per mezzo del tubo *bd*; così la compressione dell'aria si conserva, ed il getto avrà luogo finchè l'acqua nel recipiente A non discenda sotto l'estremo *s* del tubo *ts*.

Fontana intermittente.

144. Nel fondo del recipiente A di cristallo (Fig. 151) si apre il tubo *bc*, terminato in basso con un taglio ad unghia, e con questa poggia sul bacino *de*, sul quale è ritenuto verticalmente per mezzo dell'anello *k*. Su di una ghiera metallica che unisce il tubo *bc* al recipiente A sono impiantati dei piccoli condotti *a,b*, ecc., che comunicano coll'interno dello stesso recipiente; e sul fondo del bacino *de* evvi un foro *o* che si apre nel sottoposto recipiente *g*, e di tal diametro che l'acqua versata dai tubi *a,b*, ecc., non passi nel recipiente *g* a misura che giunge sul bacino. Or empito di acqua il recipiente A pel suo orifizio superiore e chiuso questo dal corrispondente turacciolo smerigliato, i condotti *a,b*, ecc., verseranno nel sottoposto bacino, ed il voto così prodotto nella parte superiore di A sarà ripianato dall'aria che accorre pel meato inferiore del tubo *bc*. Ma poichè per l'orifizio *o* non può esser tutta scaricata nel recipiente *g*, così andrà elevando il suo livello nel bacino *de*, e l'orifizio inferiore del tubo *bc* ne sarà bentosto coverto. Allora l'interno di A non potendo vieppiù comunicare coll'ambiente esterno, il voto ivi sarà progressivo, e quando la tensione dell'aria interna continuamente rarefatta, e la pressione dell'acqua sulle luci dei condotti *a,b*, ecc., non saranno più valevoli a superare l'opposta pressione atmosferica, allora il getto cesserà di aver luogo. Intanto l'acqua continuando a fluire in *g* farà discendere il livello nel bacino *de*; l'orifizio inferiore del tubo *bc* tornerà a rimanere aperto, e l'aria esterna slanciandosi a riempire il voto prodotto in A, farà ricominciare il getto dei tubi *a,b*, ecc. Così l'acqua tornerà di nuovo ad innalzarsi nel bacino *de*, il meato inferiore del tubo *bc* sarà chiuso una seconda volta, e i condotti cesseranno di gettare. E per questo avvicendarsi di azione e di ri-

poso, che durerà finchè siavi acqua nel recipiente A, l'apparecchio descritto ha ricevuto il nome di *fontana intermittente*.

CAPO QUINTO.

TENSIONE DEI VAPORI.

145. La forza con cui i gas tendono a vieppiù espandersi ha ricevuto il nome di *tensione*, e si misura in atmosfere prendendo ad unità quella tensione che fa equilibrio al peso di una colonna di mercurio di egual base ed alta $0^m,76$. Manometri.

Gli apparecchi destinati a misurare la tensione dei gas diconsi *manometri*; e ve ne sono varie specie. Nella fig. 158 è rappresentato il *manometro ad aria libera* di Regnault, composto di due tubi di cristallo di egual diametro T,T' uniti per mezzo del robinetto R, che a piacere dello sperimentatore chiude od apre comunicazione sia tra i due tubi, sia di uno qualunque di essi o di ambidue collo spazio esterno. Il tubo T è superiormente aperto, T' finisce in un cannello sottile che per mezzo di rubinetto si apre nel recipiente del gas. Quando il mercurio versato nel sifone formato dai due tubi, si tiene ad uno stesso livello, il gas fa equilibrio alla pressione dell'aria esterna; ma se nel tubo T il mercurio stesse più alto o più basso che in T', la tensione del gas sarebbe maggiore o minore della pressione atmosferica di quanta è la differenza di livello nei due tubi.

Stante che la legge di Mariotte non è rigorosamente vera neppur per l'aria, il manometro che abbiamo descritto è un istrumento indispensabile ogni volta che si ha da misurare esattamente la tensione di un gas; ma se volesse applicarsi alla misura della tensione del vapore nell'uso che ne fa l'industria, riuscirebbe assai incomodo per la lunghezza corrispondente a più atmosfere, che dovrebbe avere il tubo T. In simili casi fa

d'uopo usare il *manometro ad aria compressa*, o meglio il *manometro metallico* di Bourdon. Il primo di questi due manometri è rappresentato dalla fig. 160. Si compone di un forte tubo di cristallo voltato a sifone, che da un lato comunica colla caldaia a vapore, e dall'altro finisce nel tubo conico DE, chiuso superiormente e pieno di aria secca. La forma conica data a questa porzione del tubo fa sì che la scala in atmosfere vi si trovi disegnata in parti presso che eguali; e le due cavità A e B, da cui è interrotta la continuità del tubo, servono ad impedire che porzione dell'aria contenuta in DE possa venire aspirata, quando nell'altro braccio, si produca un voto per liquefazione del vapore; imperocchè l'aria pel gran volume che acquista espandendosi nella cavità B, è tosto equilibrata dal mercurio che si eleva in A.

E quanto al *manometrico metallico* di Bourdon, che ha sottratto le macchine a vapore dai pericoli derivanti dall'estrema fragilità dei manometri ad aria compressa, lo si costruisce dietro gli stessi principii seguiti nella composizione dei barometri dello stesso nome. Un tubo metallico schiacciato ABC (Fig. 159) chiuso in C e comunicante in A colla caldaia a vapore, varia la sua curvatura inversamente alla tensione del vapore che lo riempie; e questo moto che si porta interamente sull'estremo libero C, giacchè l'estremo A è fisso, viene comunicato all' indice *st*, scorrevole sopra un arco graduato in atmosfere.

Dipendenza della tensione del vapore dalla temperatura del liquido generatore — Metodo di Dalton.

146. Dalton fu il primo a rilevare la differenza che esiste tra il vapore isolato e quello tuttavia sovrastante al liquido generatore. Nel primo caso un accrescimento di temperatura non altrimenti farà variare la tensione del vapore che aumentandone l'espansibilità, mentre nel secondo all'accrescimento di questa forza nel vapore che già esisteva, si aggiunge quella del nuovo vapore che si forma. Ed è tanta la differenza che corre tra questi due stati che portando a 230° la temperatura del vapore che satura un dato spazio a 0°, la sua tensione si accrescerà nel rapporto di 5 a 9, mentre si sarebbe aumentata nella ragione di 5 a 20926 se il liquido generatore si fosse e-

levato dalla temperatura 0° a quella di 230°. Donde si rileva di quanta importanza sia il definire la tensione del vapore in rapporto alla temperatura del liquido che lo produce.

Per temperature non eccedenti il grado di ebollizione del liquido la richiesta dipendenza fu trovata da Dalton nel seguente modo. Versato del mercurio in una caldaia di ferro sovrapposta ad un fornello, egli v'immergeva le estremità di due tubi da barometro, l'uno interamente pieno di mercurio e destinato a misurare la pressione atmosferica, l'altro che lo era in massima parte, nel resto veniva empito del liquido su cui si voleva sperimentare. Circuiva i due tubi con un largo cilindro di cristallo che poggiando inferiormente sul mercurio della caldaia li superava in altezza; e riempiva il cilindro di acqua o di olio a norma della temperatura a cui voleva sottoporre il liquido in esperimento. Così le correnti, che si stabilivano nel fluido sovrastante alla caldaia, recavano il calore al liquido messo a pruova, e che trasformandosi in vapore faceva scendere il livello del mercurio su cui galleggiava. E la differenza di livello che si osservava nei due tubi, corretta della parte dovuta alla temperatura e pressione del liquido ambiente, rappresentava la tensione del vapore prodotto, mentre un termometro che stava immerso nel bagno faceva conoscere il grado di calore del liquido generatore. A questo modo Dalton trovava che ogni liquido alla temperatura della sua ebollizione dà un vapore di tensione pari ad un'atmosfera.

147. Il metodo di Dalton non era applicabile al caso di temperature inferiori a quella del mezzo ambiente. Fu all' uopo accomodato da Gay-Lussac, partendo da un principio già noto a Watt, e che può chiarirsi colla seguente sperienza. Due caraffini di vetro *a* e *b* (Fig. 147) contengono dell'etere, e comunicano per mezzo del tubo *c*; da *b* poi parte il tubo *de*. S' immergano i due caraffini in un recipiente di acqua riscaldata fino a produrre l'ebollizione dell'etere; e quando i vapori ne avranno espulso l'aria, immergasi l'estremità inferiore del tubo *de* in un pozzetto di mercurio, e si tolgano i caraffini dal bagno. Il loro successivo raffreddamento farà scemare la ten- **Metodo di Gay-Lussac.**

sione del vapore e salire il mercurio nel tubo *de*, finchè l'etere non avrà preso la temperatura del mezzo ambiente. Allora si circondi di ghiaccio pesto uno dei caraffini, e si vedrà il mercurio vieppiù salire nel tubo *de*; e se quando è divenuto stazionario, si circondi di ghiaccio pesto anche l'altro caraffino, nessun altro movimento si osserverà nel mercurio. La qual cosa dimostra che in uno spazio le cui parti hanno diversa temperatura, qual'è il caso di un solo caraffino raffreddato, il vapore si equilibra prendendo la tensione corrispondente alla parte più fredda.

Premesso questo principio egli è facile comprendere come Gay-Lussac modificasse il metodo di Dalton, per misurare la tensione del vapore a temperature inferiori a quelle del mezzo ambiente. Egli curvava l'estremità superiore del tubo barometrico, in cui era stato indrotto il liquido da sperimentare, e la immergeva in un bagno che gradatamente raffreddava: il vapore bentosto si equilibrava in tutta la camera barometrica, e mercè l'abbassamento della colonna mercuriale faceva conoscere la sua tensione sotto la temperatura del bagno. Così Gay-Lussac ebbe la tensione del vapore acqueo fino a —20°.

Metodo di Regnault.

148. Nuovo immegliamento il metodo di Dalton ha ricevuto da Regnault. L'apparecchio usato per le temperature tra —32° e +50° circa, è rappresentato dalla fig. 161. Due barometri perfettamente simili B e B′ pescano in un medesimo pozzetto; ed il secondo per mezzo di un tubo ricurvo comunica con un globo di vetro, e per mezzo del tubo C colla campana di una macchina pneumatica. Nel globo evvi una boccettina chiusa alla fiamma dopo averla riempita di acqua allora tolta dall'ebollizione. Le camere dei due barometri ed il globo stanno in una cassa metallica, che ha una finestra chiusa da lastra di cristallo a facce parallele, per osservare le altezze del mercurio nei due barometri e misurarne la differenza col catetometro.

Per disseccare la camera del barometro B′ e l'interno del globo, vi si faceva il voto, e poi si lasciava rientrar l'aria ob-

bligandola a passare per un tubo che conteneva sostanze disseccanti. Ripetuta più volte questa operazione e fatto definitivamente il voto, si empiva la cassa di ghiaccio pesto, e si misurava col catetometro la differenza di altezza dei due barometri: si conosceva così qual tensione alla temperatura 0° aveva quel poco di aria che la macchina non aveva potuto aspirare. Indi si rimoveva un po' di ghiaccio dal globo, ed avvicinandovi un carbone acceso, si otteneva che la boccetta rompendo per dilatazione dell'acqua lasciasse questo liquido svaporare in uno spazio voto ed a 0°. Il vapore prodotto aggiungeva la sua tensione a quella dell'aria residua, ed il nuovo abbassamento di mercurio nel barometro B′ la faceva valutare.

Sostituendo l'acqua al ghiaccio nella cassa A, e riscaldandola con una lucerna a spirito di vino, si aveva la tensione del vapore per temperature superiori a 0°; e pei gradi inferiori a 0° si sostituiva alla cassa una campana di cristallo piana di una soluzione concentrata di cloruro di calcio, nella quale immergendo a poco a poco dei pezzetti di ghiaccio se ne faceva scendere la temperatura fino a —32°.

La tensione del vapore acqueo era stata misurata fino alla temperatura di 224° da Dulong ed Arago per mezzo di un manometro ad aria compressa. Ma la poca sensibilità dell' apparecchio per le alte tensioni e l'incertezza che il metodo stesso lasciava sulla vera temperatura del vapore, ne resero poco soddisfacenti i risultati. Regnault si è occupato di questa importante quistione, e partendo dal principio che il vapore ha sempre una tensione eguale alla pressione cui soggiace il liquido in bollimento, ideò l'apparecchio rappresentato dalla fig. 162. Sul coperchio di una caldaia A ermeticamente chiusa stanno scolpiti quattro fori che immettono in tubi di ferro pieni di mercurio e destinati a ricevere altrettanti termometri per misurare la temperatura del vapore prodotto dall'acqua in ebollizione. La caldaia per mezzo del tubo B comunica col recipiente C circondato d'acqua fredda, e pieno di aria la cui tensione può variare a piacere dello sperimentatore, stante chè il tubo D serve ad unire il recipiente C sia con una macchina pneu-

matica sia con una tromba premente, mentre il tubo E lo pone in comunicazione con un manometro ad aria libera. Il vapore a misura che si svolge dall'acqua bollente è liquefatto nel tubo B, e ricade nella caldaia, poichè quel tubo è circondato da un altro più grande e pel quale corre continuamente dell'acqua fredda: così l'ebollizione ha sempre luogo sotto la pressione dell'aria contenuta in C. A questo modo si ebbero precise misure della tensione del vapore e del suo grado termometrico, e nella tavola seguente si hanno alcuni dei risultamenti ottenuti da Regnault.

TEMPERATURE.	TENSIONI	
	In millimetri	In atmosfere
—32°	0,520	
25	0,605	
15	1,400	
5	3,113	
0	4,600	
+10	9,165	
15	12,699	
20	17,391	
50	91,982	
100	760,000	1
121	1539,250	2
134	2283,920	3
144	3040,260	4
152	3777,740	5
159	4534,360	6
165	5274,340	7
200	11688,960	15
230	20926,400	27,5

Dai numeri segnati in questa tavola si rileva che la tensione del vapore cresce assai più rapidamente della temperatura; imperocchè elevandosi la temperatura da 100° a 121° la tensione si raddoppia, si triplica nel passaggio da 100° a 134°, ecc.

Nella tavola non si trovano segnate che le tensioni corrispondenti a certe temperature; per ogni altro grado che quantunque compreso tra —32° e +230°, non siavi notato, si

potrà avere la corrispondente tensione mercè la semplicissima formola:

$$\log e = 5{,}58188 \log(1 + 0{,}0062108t)$$

data da Müller e che rappresenta con soddisfacente esattezza i valori trovati da Regnault. Con e vi è rappresentato la tensione del vapore in atmosfere, e t indica la differenza tra la temperatura data e 100°, differenza che sarà positiva o negativa, secondochè la temperatura sarà maggiore o minore di 100°.

* **149.** Avogrado ha determinato nel seguente modo la tensione del vapore di mercurio a diverse temperature. Egli prese un tubo di vetro ABC (Fig. 152) voltato a sifone e terminato dalla palla A, che riempì per due terzi di mercurio e nel resto di aria secca; fermò il sifone ad una scala di ottone divisa in millimetri e l'immerse in un bagno di olio di oliva, la cui temperatura si aveva da un termometro H, graduato da 0° a 300°. Avendo precedentemente determinata la tensione che l'aria acquistava tra gli stessi limiti di temperatura, gli fu agevole assegnare la parte dovuta al vapore di mercurio nell'innalzamento del liquido nel braccio BC. Così ebbe i risultamenti che seguono: Tensione del vapore di mercurio.

Temperature	*Tensioni in mm.*
230°	58,01
240	80,02
250	105,88
260	133,62
270	165,22
280	207,59
290	252,51

E trovò ancora che i numeri ottenuti nelle sue sperienze stavano congiunti dalla formola empirica:

$$\log e = -0{,}64637t + 0{,}076956t^2 - 0{,}18452t^3,$$

nella quale e rappresenta la tensione in atmosfere, t indica la temperatura che ha 100° per unità ed è numerata positiva-

mente da 360° a 0°, dimodochè per 200°,250°, ecc., si ha $t=1,6$; 1,1; ecc. Mercè questa formola si trova che alla temperatura di 60° la tensione del vapore di mercurio è $0^{mm},0004$, e quindi il metodo di Regnault per la tensione del vapore acqueo tra —32° e +50° non ebbe bisogno di correzione pel vapore prodotto dal mercurio. E tanto meno ne han bisogno le osservazioni barometriche, poichè il valore dato dalla formola per la tensione del vapore di mercurio a 30° è $0^{mm},000009$.

Dipendenza della tensione dei vapore dai sali sciolti nel liquido generatore.

150. Se i sali sciolti nell'acqua (n° 104) ne innalzano il grado di ebollizione, era facile vedere che sarebbero ancora stati di ostacolo alla celerità dell' evaporazione. Facendo svaporare una soluzione di cloruro di calcio nel voto barometrico, e comparando la tensione del vapore prodotto a quella che in simili circostanze prende il vapore dell'acqua pura, si sono ottenute le seguenti relazioni:

TEMPERATURA.	TENSIONE DEL VAPORE		RAPPORTO DELLA PRIMA ALLA SECONDA.
	Da una soluzione di cloruro di calcio	Dall'acqua pura	
19°	9	16,3	0,55
35	26,8	41,8	0,641
59	92,8	141,8	0,654
65	121,6	186,6	0,652
78	212	326,8	0,645

Esiste dunque un rapporto presso che costante tra la tensione del vapore svolto dalla soluzione di cloruro di calcio e quella del vapore prodotto dall'acqua pura. Questo rapporto, che sarà necessariamente vario secondo la natura del sale e la quantità che n'è disciolta, ci fa comprendere la ragione per la quale l'aria sovrastante al mare non sia costantemente satura di vapore.

Miscela di vapore e gas.

151. Nell'esporre il primo metodo di Regnault sulla misura della tensione del vapore acqueo, abbiamo ammesso che il va-

pore mescolandosi con un gas aggiunga la sua tensione a quella dell'altro. Questo è ciò che precisamente ha trovato Dalton, e che Gay-Lussac ha messo in evidenza per mezzo dell' apparecchio rappresentato dalla fig. 154. Si compone di un cilindro graduato *ab* di cristallo, chiuso dai rubinetti *m* e *m'* di ferro, e comunicante col tubo *cd*. Riempito il cilindro *ab* di mercurio perfettamente asciutto, vi si avvita il globo *k* pieno di gas ben secco, e si aprono i due rubinetti *m* ed *m'*; a questo modo il gas penetra in *ab*, e quando ne sia entrata una sufficiente quantità, si chiuderanno i robinetti e si toglierà via il globo. Ridotto il gas alla pressione dell'aria col portare il mercurio ad uno stesso livello nei due tubi, pongasi nel luogo che prima occupava il globo, il piccolo imbuto *n*, provvisto di rubinetto che in vece del solito foro ha una piccola cavità, la quale girata in alto serve a ricevere alcune gocce di acqua che lascia poi cadere in *ab*; quando è portata in basso con un mezzo giro del rubinetto. L'acqua penetrando in *ab* si svolge in vapore e fa bassare il livello del mercurio; e ripetendo la stessa operazione, finchè non siavi ulteriore abbassamento, si avrà la certezza che lo spazio occupato dal gas è saturo di vapore. Allora aggiungendo nuovo mercurio in *cd* si porterà il gas al volume che prima aveva, e la differenza di livello che si troverà tra il mercurio di *ab* e quello di *cd*, rappresenterà la tensione del vapore. Or se nelle medesime circostanze introducasi un poco di acqua nella camera di un barometro, si vedrà il mercurio scendere di una quantità eguale a quella di cui si è innalzato in *cd* al di sopra di *ab*. Il vapore dunque mescolandosi ad un gas, con cui non ha rapporto di azione chimica, ne accresce la tensione di quanto è quella che avrebbe avuta se lo spazio fosse stato voto.

CAPO SESTO.

IDEA DELLA MACCHINA A VAPORE.

Prime applicazioni della forza del vapore.

152. Un secolo prima dell'era volgare Erone di Alessandria immaginava l'apparecchio rappresentato dalla fig.162'(Tav.XII *bis*). Sul coperchio di una caldaja A che n'è chiusa perfettamente, sta il sostegno *bc* terminato in una punta, la quale entra in una piccola cavità fatta sulla superficie di un globetto *e*. Nell'estremità opposta del diametro che passa pel punto *c* il globetto è incontrato dal tubo *d*, che poi finisce nell'interno della caldaja superiormente al livello dell'acqua. Il globetto, mobile sulla punta *c* del sostegno *bc*, e sul tubo *d*, porta diametralmente opposti ed in piano perpendicolare all'asse di rotazione i due tubi *s* e *t* voltati ad angolo in contrario senso. Accendendo il fuoco sotto la caldaja, il vapore prodotto dall'acqua passerà pel tubo *d* nel globo *e*, e fuggendo per gli orifizii dei condotti *s* e *t*, imprimerà al globo un moto di rotazione.

Nel 1606 Giambattista La Porta pubblicava in Napoli una traduzione dell'opera di Erone (*Spiritalia*) in cui è indicata la precedente sperienza, e vi aggiungeva la descrizione di un apparecchio da lui inventato, e che si vede nella fig. 163'. Una caldaja A finisce in un lungo collo che si apre nel recipiente BC superiormente al livello dell'acqua che vi è contenuta. Il recipiente è interamente chiuso, ed un sifone che con un estremo pesca nell'acqua, passa per un foro fatto al coperchio, e finisce nello spazio esterno. Riscaldando l'acqua della caldaja, il vapore che se ne svolge, preme sull'acqua del recipiente BC e l'obbliga ad uscire pel sifone.

Tra i diversi apparecchi ideati prima dell'invenzione della macchina a vapore propriamente detta, se ne trova descritto uno, rimarchevole pel suo congegnamento, nell'opera — *Le Machine del sig. G. Branca* — pubblicata a Roma nel 1629.

Da una caldaja A (Fig. 164') che ha forma di busto, il vapore si slancia sulle cassette della ruota orizzontale B. Questa movendosi fa girare la lanterna C, quindi la ruota D ed il cilindro E, il quale sollevando alternativamente i due pestelli H ed H' li lascia poi ricadere nei corrispondenti mortai.

Questi ed altri simili apparecchi non sono che trasformazioni più o meno ingegnose di una macchinetta conosciuta da remotissimo tempo sotto il nome di *eolipila*, che vuol dir *porta di Eolo*, conformemente alla favola che rappresentava i venti chiusi in un antro sotto il comando del nume Eolo. Questo apparecchio immaginato dagli antichi per ispiegare l'origine dei venti, non era che una piccola sfera di rame che in un punto della sua superficie teneva impiantato un piccolo cannello: messa dell'acqua nella sfera ed avvicinata l'eolipila al fuoco, si vedrà il vapore uscire dal cannello con forza crescente, a misura che la temperatura dell'acqua si eleva.

153. L'eolipila fu il germe delle macchine a vapore [1]. L'idea di porne a profitto la forza espansiva surse nella mente di parecchi, e specialmente di Papin, fisico laborioso e sventurato, che il primo fè conoscere come il vapore potesse produrre un voto e far della pressione atmosferica una forza motrice. Di questa scoverta del Papin si avvantaggiò il Savery nel comporre la prima macchina a vapore che abbia ricevuta realmente un'applicazione industriale. La macchina di Savery è rappresentata nella fig. 169'. Dalla caldaja A, provveduta della sua valvola di sicurezza V, parte il tubo B che per mezzo del ru- Macchina a vapore di Savery.

[1] Il sig. Figuier nella sua egregia opera — LA MACHINE A VAPEUR — sostiene che l'eolipila e gli apparecchi che ne son derivati non possano riguardarsi quai *primo esempio* (son parole di Arago) *dell'applicazione del vapore come forza motrice*, poichè gli antichi credendo che l'acqua col calore si cambiasse in aria, non potevano conoscere l'esistenza del vapore. Non sappiamo comprendere come il dotto storiografo della macchina a vapore avesse potuto dimenticare che gli antichi denominavano *aria* ogni fluido elastico. Così il gas idrogeno, l'acido carbonico, l'azoto furono indicati dai loro inventori coi nomi di *aria infiammabile*, *aria fissa*, *aria mofetica*. L'acqua dunque trasformata in aria non voleva dir altro che acqua mutata in fluido elastico, qual'è il vapore; nè oggi sotto il puro aspetto fisico si saprebbe indicare una essenziale differenza tra l'aria ed il vapore.

binetto C può aprire o chiudere una comunicazione col recipiente E. Dal fondo di questo prende origine il tubo F, che poi si ramifica nei due G ed H, provveduti delle valvole *t* ed *s* che si aprono dal basso in alto. In fine K è un recipiente di acqua fredda, destinata ad esser versata di tempo in tempo sulla superficie del vase E che all'uopo è circuito da un altro rappresentato nella figura da una linea punteggiata.

La macchina era posta in azione nel seguente modo. Quando nella caldaja la tensione del vapore era maggiore di un'atmosfera, si apriva il rubinetto C, ed il vapore slanciandosi nel vase E ne cacciava l'aria pel tubo G. Ottenuto ciò si chiudeva il rubinetto C e si apriva *f*: l'acqua cadendo sulla faccia esterna del vase E, vi condensava il vapore; e l'aria esterna accorrendo a riempire il voto, chiudeva la valvola *t* ed obbligava l'acqua a salire da R in E pel tubo H. Riaprendo il robinetto C, il vapore cacciava l'acqua dal vase E come n'aveva già espulsa l'aria; e quando poi si chiudeva C e si riapriva *f*, il vapore veniva condensato, e nuova aspirazione di acqua avveniva pel tubo H. Bastava dunque aprire e chiudere ad intervalli i rubinetti C ed *f*, perchè anche ad intervalli l'acqua fosse aspirata pel tubo H e poi spinta dal vapore pel tubo G.

Macchina di Newcomen e Cawley. 154. La macchina di Savery richiedeva necessariamente che la tensione del vapore superasse quella dell'aria esterna, e tanto più per quanto era più grande l'altezza a cui l'acqua si voleva innalzare; bisognava una tensione di 2 atmosfere per elevar l'acqua a 10 metri, e di 3 atmosfere per innalzarla a 20. Quindi non solamente la caldaja, ma il recipiente G ancora doveva essere abbastanza forte; quest'ultimo però doveva aver pareti abbastanza sottili perchè l'acqua aspersa sulla sua faccia esterna, avesse potuto condensar celeremente il vapore nell'interno. Queste due incompatibili condizioni a cui avrebbe dovuto soddisfare il vase G, fecero che si tornasse all' idea di Papin, cioè a servirsi del vapore pel solo oggetto di formare un voto, e quindi utilizzare la pressione dell' aria. Così nel 1711, dodici anni dopo l'invenzione di Savery, ebbe origine una seconda macchina a vapore per opera di Newcomen e Caw-

ley. La si vede nella fig. 165'. Da una caldaja A colla sua valvola di sicurezza O, è dato il vapore al cilindro C. In questo è scorrevole lo stantuffo H, unito mercè una catena ad una delle estremità di un pesante bilanciere L mobile intorno al suo punto di appoggio: dall'altro estremo del bilanciere pende il contrappeso M a cui è unita una lunga pertica N che deve trasfondere il moto nelle trombe destinate a disseccare il fondo di una miniera.

Quando la macchina si vuol mettere in azione, si apre il rubinetto *a*, ed il vapore entrando nel cilindro, solleva lo stantuffo H, ed il contrappeso M discende. Giunto lo stantuffo all'alto della sua corsa, si chiude il rubinetto *a* e si apre *b* che per mezzo del tubo *d* fa scorrere dell'acqua fredda dal recipiente G nel cilindro: il vapore ne resta condensato, si forma un voto e l'aria premendo sulla testa dello stantuffo lo fa ricadere sul fondo, mentre l'acqua che ha condensato il vapore, n'esce pel foro F, menata via pel tubo *c*. Il contrappeso M ch'era disceso, sale col cadere dello stantuffo, per quindi nuovamente scendere quando sarà riaperto il rubinetto *a* e chiuso *b*.

155. Nel 1763 Iames Watt, il più grande meccanico del suo secolo, era un giovine costruttore di strumenti matematici, addetto come macchinista al collegio di Glascow. Nel gabinetto fisico di quel collegio si trovava un bel modello della macchina di Newcomen, ma che non si era giammai riuscito a farlo andar bene. Watt ebbe l'incarico di accomodarlo, e facendosi a ricercar le cagioni che ne impedivano il buon andamento, venne a scovrire dei difetti nell'organamento stesso ideato da Newcomen. Egli osservava che l'acqua introdotta nel cilindro per condensare il vapore, ne raffreddava le pareti, che poi venivano nuovamente riscaldate dal vapore che succedeva al già liquefatto; e trovò che il calore così assorbito era di tanta importanza da equivalere alla metà circa del combustibile consumato. Vide inoltre che l'acqua injettata nel cilindro non lo lasciava voto dopo avervi liquefatto il vapore, poichè essa stessa ne produceva dell'altro per mezzo del calore che

Macchina di Watt a semplice effetto.

sottraeva al cilindro; e questo vapore così prodotto scemava di circa un quarto l'effetto della macchina.

A toglier di mezzo questi difetti Watt pensò di liquefare il vapore fuori del cilindro, e fece così la prima ed importante scoverta che fu quella del *condensatore isolato*, ossia di un recipiente unito al cilindro, ed in cui il vapore viene a condensarsi dopo aver sollevato lo stantuffo.

La vera forza motrice nella macchina di Newcomen è la pressione dell'aria; il vapore non interviene che come mezzo di produrre il voto; quindi è che la macchina di Newcomen ha ricevuto ancora il nome di *macchina atmosferica*. Watt pensò servirsi del vapore anche come forza motrice, e così inventò la prima *macchina a vapore* propriamente detta; oggi conosciura sotto il nome di *macchina a semplice effetto*. Il cilindro BB′ (Fig. 167′) di questa macchina comunica in C e D col tubo HM che parte dalla caldaja. Quando la valvola H è aperta e son chiuse le valvole L ed M, il vapore entra nello spazio B e fa scendere lo stantuffo fino al punto infimo della sua corsa. Allora chiudendo la valvola H ed aprendo L, il vapore si diffonde negli spazii B e B′; e lo stantuffo tra due pressioni eguali ed opposte, cede all'azione del contrappeso aggiunto all'altro braccio del bilanciere e sale fino al fondo superiore del cilindro. Ottenuto ciò, si apre la valvola M, ed il vapore va a liquefarsi nel condensatore; dopo di che si riapre la valvola H, lo stantuffo torna a discendere, e così di seguito.

E per formarsi un'idea dei grandi vantaggi che queste prime scoverte di Watt recarono all'industria inglese, basterà conoscere che associatosi con Boulton stabilirono a Soho nel 1774 una fabbrica delle nuove macchine, e le cedevano pel solo compenso di percepire il terzo sul valore del combustibile che esse facevano risparmiare. Or dalla sola miniera di Chacewater e per tre delle nuove macchine Watt e Boulton ebbero il beneficio annuo di 60,000 franchi, vale a dire che le tre nuove macchine facevano risparmiare 180,000 franchi all' anno sulla spesa del combustibile.

156. Le invenzioni avvengono quando e dove l'ingegno del-

l'uomo è scosso da un qualche urgente bisogno. Perciò le ricerche di Papin sul vapore ebbero sviluppo ed applicazione nell'Inghilterra, quando la sua industria si vide nell'imminente pericolo di rimaner annullata dalle enormi correnti di acqua che s'incontrano nelle sue miniere di carbon fossile. E le macchine di Savery, di Newcomen, di Watt, che finora abbiamo descritte, non furono ideate che per disseccare le miniere carbonifere della Gran Brettagna. Ma Watt che vagheggiava l'idea di un motore generale e che vedeva la possibilità di attuarla per mezzo del vapore, non poteva contentarsi di vederla limitata al disseccamento delle miniere. La macchina a semplice effetto non era però sufficiente all'uopo: il vapore agendo nella sola discesa dello stantuffo, gli comunica un movimento irregolare, il quale se non apporta nocumento all'azione di una tromba, guasterebbe ogni altro macchinismo a cui fosse comunicato.

Macchina a doppio effetto.

Questa prima difficoltà fu superata da Watt in un modo semplicissimo. Egli coordinò il cilindro colla caldaja ed il condensatore in modo, che gli spazii B e B' (Fig. 167') fossero a vicenda in comunicazione or colla caldaja ed or col condensatore. Quando B communicava colla caldaja, B' lo era col condensatore, e viceversa: così il vapore agiva a vicenda sulla faccia superiore e sull'inferiore dello stantuffo, e producendone egualmente la discesa e la salita, se ne aveva la richiesta regolarità di movimento.

Una gravissima difficoltà intanto si presentava nella trasmissione di moto dallo stantuffo al bilanciere. Il mezzo della catena adottato da Newcomen (Fig. 165') era stato sufficiente per la macchina a semplice effetto, poichè lo stantuffo tira il bilanciere nella discesa e n'è viceversa tirato nella salita per opera del contrappeso. Ma nella *macchina a doppio effetto*, in cui il solo vapore produce i due moti dello stantuffo, questo tirando il bilanciere nella sua discesa, dovrà spingerlo viceversa quando sale; e perciò il mezzo di trasmissione del moto dovrà esser rigido. Or un'asta rigida che unisse lo stantuffo al bilanciere, sarebbe sforzata a piegarsi or dall'uno ed or dal-

l'altro lato dell'asse del cilindro, secondo la varia distanza in cui ne sarebbero i punti dell'arco descritto dall' estremità del bilanciere. Il primo spediente adottato da Watt fu quello di armare l'asta dello stantuffo di denti che si appigliavano a quelli di una ruota faciente da bilanciere; ma questo spediente fu da lui abbandonato tosto ch' ebbe fatta la stupenda scoverta del parallelogrammo articolato che porta il suo nome.

Rappresenti AO (Fig. 166') la metà della lunghezza del bilanciere, a cui nei punti A e *b* siano sospese con pernii le due verghe eguali *Ac*, *be*, articolate colla terza *ce* eguale in lunghezza alla distanza *Ab* dei punti di sospensione delle prime. Sia inoltre AOA' l'angolo di oscillazione del bilanciere, e la retta *mn*, condotta parallelamente alla corda AA' pel punto medio *s* della freccia *Ch*, rappresenti la corsa dell' asta dello stantuffo. Or il parallelogrammo *Abec*, avendo i lati mobili intorno ai rispettivi vertici, potrà durante l'oscillazione del bilanciere ricevere tale alterazione di forma, che il vertice *c* scorra lungo la retta *mn*. Considerandolo nelle tre posizioni *Abec*, $Cb'e'c'$, $A'b''e''c''$, che corrispondono al principio, mezzo e fine di un'oscillazione del bilanciere, è chiaro che obbligando il vertice *e* a muoversi sull' arco di cerchio che passa pei tre punti e, e', e'', il vertice *c* starà realmente sulla retta *mn* nel principio, mezzo e fine di un'oscillazione, e poco ne divergerà negl'istanti intermedii; dimodochè fermando l'asta dello stantuffo al vertice *c* del parallelogrammo, si è sicuro che l'oscillazione del bilanciere non la farà sensibilmente divergere dall'asse del cilindro. Or affinchè il vertice *e* del parallelogrammo scorresse sull'arco di cerchio $ee'e''$, lo si ferma con un pernio all' estremo *e* dell' asta K*e* che coll' altro estremo è mobile intorno al centro K dello stesso arco $ee'e''$: all'asta K*e* si è dato il nome di *contrabbilanciere*. Tutto ciò è geometricamente rappresentato nella fig. 166': la fig. 170' poi ci fa vedere come il parallelogrammo articolato *Abec* ed il contrabbilanciere K*e* siano ordinati in una macchina di Watt.

Ottenuto il mezzo di far muovere l'asta dello stantuffo se-

condo l'asse del cilindro, Watt si diede a ricercare il modo di produrre col movimento rettilineo dello stantuffo un altro movimento che fosse circolare; alla qual cosa riuscì facilmente imitando il congegno dell'arrotino, vale a dire applicando all'asse del volante M (Fig. 170') la manivella H. E con questo ordinamento la nuova macchina avrebbe potuto servire alla produzione di qualsiasi lavoro meccanico, qualora si fosse trovato il mezzo di far agire il vapore sullo stantuffo con una costante energia, affinchè il moto del volante riuscisse uniforme. Questa costanza di energia per una forza, qual'è quella del vapore, ch'è definita dalla maggiore o minor quantità di carbone bruciata in un dato tempo, sarebbe stata follia lo sperarla. Watt seppe renderne indipendente l'uniformità di moto del volante mercè la bella invenzione del *regolatore a forza centrifuga*. Ad un asse *tz* (Fig. 168'), che per mezzo della girella A e della corda *q* gira insieme al volante, è fermato il sistema delle due leve M*c*,M*d* mobili intorno al punto *b*. Queste leve che da una parte finiscono nelle palle metalliche M, M, dall'altra si uniscono a cerniera cogli estremi *c* e *d* dei due bracci *ec*,*ed*, articolati coll'anello *e*, il quale è scorrevole sull'asse *tz*. Allo stesso anello *e* sta unito il braccio *eg* della leva *eh* mobile sul fulcro *g*, e che nell'altro estremo si unisce all'asta *hk*; la quale elevando od abbassando l'estremo *k* del braccio *lk* mobile in *l*, fa che la valvola *s* intercetti più o meno il vapore nel suo passaggio dalla caldaja nel cilindro. Ed in vero, quando per la cresciuta forza del vapore divengono più celeri le oscillazioni dello stantuffo, ed in conseguenza più veloce la rotazione del volante e quella dell'asse *tz*, allora aumentandosi la forza centrifuga nelle palle M, queste divergeranno vieppiù dall'asse; quindi le articolazioni *c* e *d* e l'anello *e* discenderanno, *h* salirà più in alto e la valvola *s* intercetterà vieppiù il cammino del vapore. Il contrario avrà luogo, quando per la diminuita forza del vapore, le oscillazioni dello stantuffo diverranno più lente; e così ad onta della varia energia del vapore il moto della macchina si conserverà uniforme.

Macchine ad alta pressione.

157. **Poichè nelle macchine di Watt il vapore è condensato appena che lo stantuffo è per terminare un'oscillazione, ne se**gue che questo ha sempre innanzi a sè uno spazio voto, e perciò oltre l'attrito non incontra altra resistenza se non quella che la macchina è destinata a vincere. Ma se per mancanza di acqua l'uso del condensatore divenisse impossibile, allora bisognerà costruire il cilindro in modo che il vapore vada disperso nell'atmosfera, tostochè avrà compiuta la sua funzione. Laonde lo stantuffo anzichè andar incontro ad uno spazio voto, avrà sempre da vincere la pressione dell'aria, e perciò di altrettanto più grande dovrà essere la sua tensione. Quindi n'è derivata una doppia specie di macchine a vapore, le une con condensatore le altre senza: le prime, che ordinariamente agiscono colla tensione di un'atmosfera e mezzo a due atmosfere, si dicono *macchine a bassa pressione*; quelle poi senza condensatore e che sogliono aver la tensione di 5 a 6 atmosfere, si dicono *macchine ad alta pressione*. Della prima specie sono le macchine delle navi a vapore, e quelle delle locomotive appartengono alla seconda.

Le macchine ad alta tensione non hanno bilanciere: l'asta A dello stantuffo (Fig. 171') è fissata alla traversa BC, la quale mediante due girelle è mobile parallelamente a sè stessa lungo i lati DH ed LE del telajo DL. Colla traversa BC si articola in N la verga KN che dà moto al braccio KG ed in conseguenza al volante. E ciò per le macchine fisse: nelle locomotive poi non vi è volante; ma vi sono due cilindri i cui stantuffi colle loro aste articolate agiscono immediatamente sulle grandi ruote del carro che trasporta la macchina.

CAPO SETTIMO.

MISURA DELLE DENSITÀ.

158. È noto che la gravità operando egualmente su tutti gli atomi della materia, rende la ragione dei pesi eguale a quella delle masse; è noto ancora che corpi differenti presentano pesi diseguali sotto eguali volumi. La materia è dunque variamente ordinata nei varii corpi: quelli che sotto un dato volume ne contengono maggior quantità, si dicono *più densi*, e *meno densi* quelli che ne racchiudono minor quantità. La densità è dunque una speciale grandezza; e le leggi idrostatiche ci offrono il mezzo di misurarla. Definizione.

159. Poichè i corpi, conosciuti come più densi di tutti, col freddo si contraggono, è chiaro non esistere verun aggregato materiale le cui molecole non siano separate da interstizii voti, e che in conseguenza la densità non può avere unità naturale di misura. Per agevolare la comparazione dei volumi l'unità convenzionale doveva cercarsi nella densità di un liquido, che si potesse facilmente ottenere sempre identico; ed a tal uopo si è scelta, almeno pei solidi e liquidi, l'acqua distillata ad una certa temperatura. Unità di misura — Peso specifico.

Quando di un corpo è nota la ragione della sua densità a quella dell'acqua distillata, basterà conoscere il peso di questa sotto l'unità di volume per dedurne con una semplice moltiplicazione il peso dell'unità di volume di quel dato corpo. Questo peso si denomina *peso specifico*; e poichè la ragione dei pesi specifici di due corpi è necessariamente la stessa che quella delle loro densità, così le espressioni di *densità* e *peso specifico* si hanno per sinonime.

160. Dalla definizione stessa della densità risulta — 1° Che essendo eguali i volumi, le densità debbono seguire la ragion diretta delle masse e quindi dei pesi — 2° Che le densità dei Teorema.

corpi di egual peso debbono stare nella ragione inversa dei volumi. Quindi se di due corpi, A e B, indichiamo rispettivamente con M,D,V; M_1, D_1, V_1 la massa, la densità ed il volume, avremo:

$$D:D_1 = \frac{M}{V} : \frac{M_1}{V_1}.$$

Or se consideriamo M_1, V_1, D_1 come unità di massa, di volume e densità, la proporzione si trasforma nell'equazione:

$$D = \frac{M}{V},$$

che si traduce nella definizione: *la densità è il rapporto della massa al volume*; definizione esatta, finchè M_1 e V_1 saranno unità di M e V. Così ponendo $M = 24$ chil. e $V = 5$ litri, sarà $D = \frac{24}{5} = 4,8$; essendochè il chilogrammo è appunto il peso di un litro di acqua distillata. Ma se M fosse data in chilogrammi e V in piedi cubici, la comparazione di M a V non potrebbe farsi senza aver prima tradotto il numero M in peso del piede cubico di acqua distillata, ovvero V in litri.

Dall'equazione $D = \frac{M}{V}$ derivano poi le altre due.

$$M = D.V, \text{ e } V = \frac{M}{D},$$

di cui sovente si fa uso. E dalla stessa equazione si rileva ancora come il peso specifico concreti l'idea astratta di densità, imperocchè sostituendovi ad M l'equivalente peso P del corpo, sarà $\frac{P}{V}$ il peso dell'unità di volume dello stesso corpo, o in altri termini il suo peso specifico.

Densità dei solidi.

161. Il principio che le densità sono in ragione diretta dei pesi quando i volumi sono eguali, è quello che si applica alla misura delle densità, stante che pei solidi in ispecie riesce agevole per mezzo del teorema di Archimede (nº 121) di determinare l'eguaglianza di volume con un dato liquido. Per-

ciò si pesa primieramente il solido nell'aria, indi si sospende con un filo ad una delle coppe della bilancia e si fa pescare nell'acqua distillata: il peso così perduto rappresenterà quello dell'egual volume liquido discacciato, ed in conseguenza basterà dividere il peso proprio del corpo per la perdita di peso fatta nell'acqua, per ottenere l'espressione numerica della sua densità.

Se il solido sia solubile nell'acqua, si peserà in altro liquido che non possa alterarlo. Chiamando p la perdita di peso che il solido farà nel secondo liquido, la cui densità sia d, ed x quella che verrebbe fatta nell'acqua, avremo evidentemente la proporzione:

$$x:p=1:d\text{, donde } x=\frac{p}{d}.$$

E se in fine il solido fosse nello stato di polvere, allora dopo averne determinato il peso, se ne cercherebbe il volume collo steorometro di Say; ed il quoziente del primo numero pel secondo ci darebbe l'espressione della densità.

162. Mercè lo stesso principio di Archimede si misurano le densità dei liquidi. Determinando le perdite di peso che uno stesso solido farà in più liquidi differenti, si avranno i pesi dei diversi liquidi sotto eguali volumi; e comparando tra loro queste perdite avremo i rapporti delle rispettive densità. Poniamo a modo di esempio, che il solido adoperato perda il peso π nell'acqua distallata ed i pesi p_1, p_2, p_3, ecc., negli altri liquidi messi ad esperimento; le densità di questi liquidi saranno date dai quozienti $\frac{p_1}{\pi}, \frac{p_2}{\pi}, \frac{p_3}{\pi}$, ecc. Densità dei liquidi.

L'*areometro* di Farhenheit serve a far determinare agevolmente le perdite π, p_1, p_2, p_3, ecc. Si compone di un cilindro A (Fig. 170) di sottile lamina di ottone, le cui basi finiscono in due coni eguali: il cono inferiore porta l'appendice C carica di palline di piombo, affinchè l'apparecchio resti verticale durante l'immersione; ed il cono superiore mercè un cilindretto metallico sostiene il bacino D. Determinato il pe-

so P dell'apparecchio, s'immergerà nell' acqua distillata e si graverà il bacino di pesi, finchè il livello dell'acqua non giunga ad un segno z fatto sul sostegno del bacino: chiamando p la carica del bacino, sarà $P+p$ il peso del volume liquido scacciato dall'areometro; e saranno similmente $P+p'$, $P+p''$, ecc., i pesi dei volumi eguali scacciati in altri liquidi, supponendo che p', p'', ecc., rappresentino le cariche che avrà dovuto ricevere il bacino perchè l' areometro rimanesse immerso fino al segno z.

Sostituendo una secchiolina all' appendice C Nicholson ha reso l'areometro di Farhenheit atto a determinare le densità dei solidi che si possono immergere nell'acqua. Ed in vero dopo aver caricato il bacino fino a far discendere l'areometro al suo livello, vi si ponga il corpo su cui si vuole sperimentare, e si diminuisca la carica in modo da far restare l' areometro al suo livello: il peso che avremo sottratto, rappresenterà quello del corpo messo in sua vece. Ottenuto ciò, si tolga il corpo dal bacino e si ponga nella secchia, legandolo ad essa con un filo nel caso che sia più leggiero dell'acqua: vedremo allora l'areometro sollevarsi alquanto sul livello del liquido in conseguenza della perdita di peso fatta dal corpo immerso; ed il peso che dovremo aggiungere per farlo tornare al suo livello ci rappresenterà quello del volume di acqua discacciato dal solido. Avremo così i due termini della densità, cioè il peso del corpo e quello di un egual volume di acqua.

L'areometro di Farhenheit dà l'espressione della densità di un liquido, posto che sia quella dell'acqua $=1$. Ma di molti liquidi usati nell'industria giova conoscere la densità assoluta, anzichè il suo valore relativo all'acqua; ed a questo fine sono ordinati alcuni speciali areometri, conosciuti sotto i nomi di *pesa-acidi*, *pesa-alcool*, *pesa-mosto*, ecc. Sono essi formati di un tubo di vetro (Fig. 171), terminato inferiormente da una pallina in parte piena di mercurio; ed un cilindretto di carta chiuso nel tubo ne porta la gradazione. Quanto meno denso è il liquido, tanto più l'areometro vi si affonda, e dal grado a cui si ferma si giudica la qualità del liquido.

163. Quando le densità dei solidi si vogliono esattamente comparare, fa d'uopo che le pesate sieno ridotte ad una temperatura normale. Posta la somma variabilità della dilatazione dell'acqua, sarà meglio darle artificialmente la temperatura normale, anzichè ricorrere a formole di correzione. Ma ove ciò non si voglia, o che si tratti di liquidi diversi dall'acqua, allora chiamando α il coefficiente di dilatazione del liquido per l'intervallo che corre dal grado normale a quello che dà l'esperimento, e β l'analogo valore pel solido, è chiaro che la perdita di peso p fatta dal solido ad una temperatura che di t gradi supera la temperatura normale, per quest'ultima sarebbe stata $p\dfrac{1+\alpha t}{1+\beta t}$; imperocchè il volume del solido sarebbe diminuito nel rapporto di $1:1+\beta t$, e la densità del liquido sarebbe cresciuta nel rapporto di $1+\alpha t:1$. Correzioni delle pesate.

164. La dipendenza ch'esiste tra la perdita di peso fatta da un corpo immerso in un liquido e la temperatura dell'esperimento, è stata utilizzata da Kopp per determinare i coefficienti di dilatazione cubica dei solidi. Ed in vero chiamando π la perdita di peso che sarebbe avvenuta alla temperatura normale, e p, p' le perdite realmente ottenute alle temperature t e t' che supponiamo esser quelle dei limiti termometrici tra i quali si voglia determinare il coefficiente di dilatazione cubica della sostanza, avremo: Nuovo metodo pei coefficienti di dilatazione.

$$\pi = p\frac{1+\alpha t}{1+\beta t} = p'\frac{1+\alpha t'}{1+\beta t'},$$

donde è facile dedurre il valore del coefficiente β. Così Kopp ha ottenuto i valori qui appresso notati.

Sostanze	*Coefficienti*
Rame	0,000051
Piombo	0,000089
Stagno	0,000069
Ferro	0,000037
Zinco	0,000089
Solfo.	0,000183
Spato fluore	0,000062
Spato calcare	0,000018
Arragonite	0,000065
Spato pesante	0,000058
Quarzo	0,000042

Misura delle densità dei gas.

165. Come unità di misura per le densità dei corpi aeriformi si è presa quella dell'aria perfettamente secca, alla temperatura 0°, sotto la pressione di $0^m,76$.

Per applicare a questi corpi lo stesso principio che serve per misurare le densità dei corpi solidi e liquidi, si prenderà un globo di cristallo della capacità di circa 10 litri, e fattovi il voto meglio che sarà possibile, si prenderà nota dell'altezza del provino; indi si chiuderà il tubo che lo fa comunicare alla macchina pneumatica, e si peserà esattamente. Dopo ciò si porrà il globo in comunicazione col recipiente del gas, di cui si vuol determinare la densità, e la comunicazione sarà interrotta quando il gas avrà nel globo la stessa tensione dell'aria esterna: allora si tornerà a pesare. Chiamando P il secondo peso e p il primo, il peso del gas contenuto nel globo sarà $P - p$.

Questa deduzione però non sarebbe esatta, se la pressione e lo stato igrometrico dell'aria non fossero stati gli stessi nei momenti delle due pesate P e p. Con un metodo semplicissimo Regnault ha saputo rendere le due pesate indipendenti dalla pressione e stato igrometrico dell'atmosfera. Dopo aver determinata la perdita di peso che il globo già pieno di acqua faceva per immersione nello stesso liquido, egli prendeva un secondo globo dello stesso vetro e di volume prossimamente eguale al primo, lo riempiva similmente di acqua, e cer-

cava la perdita di peso che presentava per immersione. Se le due perdite riuscivano eguali, tali erano ancora i volumi dei due globi; ma se eravi differenza, egli univa al globo che aveva sofferto minor perdita un cilindretto di vetro, di cui diminuendo a poco a poco la lunghezza, faceva scendere la perdita di peso, accresciuta dalla presenza del cilindro, fino ad eguagliare la prima. E sospendendo i globi alle due coppe della bilancia, egli era certo che le pesate P e p divenivano indipendenti dalle alterazioni del mezzo ambiente, appunto perchè queste agivano egualmente sulle due braccia della bilancia.

Indichiamo con A l'altezza barometrica durante l'esperienza, a l'altezza residua nel provino della macchina pneumatica e t la temperatura; è chiaro che alla temperatura 0° e sotto la pressione $0^m,76$ il peso del gas entrato nel globo sarebbe stato:

$$(P-p)\frac{0^m,76}{A-a}\cdot\frac{1+\alpha t}{1+\beta t},$$

α e β indicando i coefficienti della dilatazione cubica dell'aria e del vetro.

Se questo sperimento, che supponiamo fatto sull'aria, si ripeta su di un altro gas che ci offra gli analoghi valori A', P', t', ed α', il peso del gas di cui sarebbe pieno il globo alla temperatura 0° e sotto la pressione $0^m,76$, sarà espresso da:

$$(P'-p)\frac{0^m,76}{A'-a}\cdot\frac{1+\alpha' t'}{1+\beta t'}.$$

Quindi la densità D del secondo gas, prendendo ad unità quella dell'aria, sarà data dall'equazione:

$$D=\frac{P'-p}{P-p}\cdot\frac{A-a}{A'-a}\cdot\frac{1+\alpha' t'}{1+\alpha t}\cdot\frac{1+\beta t}{1+\beta t'}.$$

In questi sperimenti la congiunzione del globo alla macchina pneumatica si ottiene per mezzo di un tubo metallico di cui il globo è provveduto. Or se il gas attaccasse il metallo, è chiaro che questo metodo non potrebbe seguirsi. In tal caso si prenderà una boccia a turacciolo smerigliato, e determina-

tane la capacità in litri, si peserà prima piena di aria, indi dopo avervi spinta una corrente del gas per un tempo sufficiente a cacciarne tutta l'aria. Siano P il primo peso, P′ il secondo, V la capacità della boccia in litri, A l'altezza barometrica nel tempo dell'esperienza e t la temperatura: sarà (n° 137)

$$1^{g},2932 \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{A}{0^{m},76}$$

il peso dell'aria contenuta nella boccia; quindi il peso della boccia vota sarà:

$$p = P - 1^{g},2932 \frac{V}{1+\alpha t} \cdot \frac{A}{0^{m},76},$$

e quello del solo gas sarà $P' - p$. Saranno così determinati i due valori da cui dipende l'espressione della densità.

Densità dei vapori. 166. Vi sono due metodi per misurare la densità di un vapore: il primo è quello di misurare il volume del vapore prodotto da un dato peso del liquido generatore, l'altro consiste in pesare un dato volume di vapore.

Col primo metodo Gay-Lussac ha determinato le densità di parecchi vapori, usando dell'apparecchio rappresentato dalla fig. 172. Una campana C di cristallo, graduata in centimetri cubici, è piena di mercurio secco e capovolta in un bagno dello stesso metallo, che trovasi nella caldaja B di ferro fuso. La campana è circondata da un largo tubo di vetro che si riempie di acqua o di olio, secondo la temperatura che si vuol dare al bagno; e nel globetto m è chiuso il liquido del cui vapore si vuol conoscere la densità. S'introduce nella campana il globetto, che per la sua leggerezza rispetto al mercurio andrà ad occupare la parte più alta; ed ivi riscaldato per mezzo del sottoposto fornello, sarà rotto dalla dilatazione del liquido che così verrà a galleggiare sulla sommità della colonna di mercurio, e trasformandosi in vapore farà scendere il livello nell'interno della campana. Se alla temperatura di ebollizione del liquido il mercurio nella campana sta tuttavia

superiore al livello esterno, si è certo che tutto il liquido adoperato si è ridotto in vapore; e basterà in conseguenza vedere sulla campana il numero delle divisioni che occupa, per saperne il volume alla temperatura t del bagno. Ma questo volume, che indichiamo con V, ha bisogno di esser corretto rispetto alla dilatazione della campana, la quale essendo stata graduata alla temperatura 0°, il volumo V che vi si legge alla temperatura t, sarebbe stato $V(1+kt)$ a 0°, k indicando il coefficiente della dilatazione cubica del vetro. Or chiamando P il peso del liquido chiuso nel globetto, quello dell'unità di volume del vapore sarà espresso da $\frac{P}{V(1+kt)}$. Sappiamo d'altronde che un litro di aria alla stessa temperatura t e sotto la stessa pressione peserebbe $1^{g},2932\frac{A}{0^{m},76}\cdot\frac{1}{1+\alpha t}$; quindi comparando questi due pesi, avremo pel vapore la densità:

$$D=\frac{P}{1^{g},2932}\cdot\frac{0^{m},76}{A}\cdot\frac{1+\alpha t}{V(1+kt)}.$$

Così, per esempio, Gay-Lussac ha trovato che la densità del vapore dell'acqua è 0,6235 ossia circa $\frac{5}{8}$ di quella dell'aria.

Del secondo metodo, cioè quello di pesare un dato volume di vapore, si è servito Dumas rispetto ai vapori generati da liquidi che bollono a temperature di molto superiori a 100°. In un globo di vetro A (Fig. 173 terminato in un collo sottile, s'introduce il liquido in quantità superiore a quella che vaporizzata empirebbe la capacità del globo. Questo per mezzo del sostegno C si fa scendere nella caldaja B che forma un bagno ad olio o sabbia e la cui temperatura è data da un termometro ad aria D che s'introduce nello stesso bagno. Quando dalla punta m non si vedrà ulteriore getto di vapore, la si chiuderà con un colpo di fiamma; e tolto allora il globo dal bagno e fatto raffreddare, si prenderà nota del suo peso P'. Prima di servirsene per l'esperimento, se ne saranno determinati il peso P e la sua capacità V; e perciò saranno noti il peso p dell'aria che vi si conteneva, il peso $P-p$ del globo

voto, ed il peso $P'-(P-p)$ del vapore che l'occupava alla temperatura T del bagno. E per assicurarsi se tutta l'aria era stata espulsa quando la punta m è stata chiusa, basterà romperla sotto al mercurio, e vedere se questo liquido va ad occupare interamente la capacità del globo. Nell'ipotési che ciò avvenga, sapendo che alla temperatura T del bagno il peso di un egual volume di aria è $1^g,2932.V(1+kT)\frac{1}{1+\alpha T}\cdot\frac{A}{0^m,76}$, ($k$ ed α indicando i coefficienti della dilatazione cubica del vetro e dell'aria ed A l'altezza barometrica nel tempo dell'esperienza) la densità D del vapore sarà data dall'espressione:

$$D=\frac{P'-(P-p)}{1^g,2932.V(1+kT)\frac{1}{1+\alpha T}\cdot\frac{A}{0^m,76}}.$$

Se poi nel globo sia restata dell'aria, si cercherà raccoglierla in una campana graduata, determinarne il volume v' che aveva alla temperatura T ed il suo peso p', ed alle espressioni $V(1+kT)$ e $P'-(P-p)$ nella formola precedente si sostituiranno le altre due: $V(1+kT)-v'$ e $P'-(P-p)-p'$.

CAPO OTTAVO.

IDRODINAMICA.

167. La celerità con cui un liquido fluisce da un foro scolpito nella parete laterale o nel fondo di un recipiente, pareggia quella che acquisterebbe un grave cadendo nel voto dalla altezza che separa il livello del liquido dal centro della luce di efflusso. Da questo teorema scoverto da Torricelli, e che l'esperienza ha dichiarato vero quando il foro è scolpito in sottilissima parete ed ha piccolissimo diametro, derivano i seguenti corollarii: — Teorema di Torricelli.

— 1°. Chiamando a l'altezza del livello del liquido sul centro della luce del foro, e v la velocità di efflusso, sarà $v=\sqrt{2ga}$.

— 2°. Supponendo che per continuo afflusso di nuovo liquido si conservi invariato il livello, sarà costante l'altezza a e quindi la velocità v; ed il volume liquido che nel tempo t fluirà dal recipiente, e che gl' idraulici appellano *portata*, sarà quello di un cilindro che avesse per base l'aria f del foro e per altezza lo spazio $tv=t\sqrt{2ga}$ che una molecola del fluido percorrebbe nello stesso tempo t colla velocità $\sqrt{2ga}$. Quindi dinotando Q la portata, sarà:

$$Q=ft\sqrt{2ga};$$

e per due luci di uno stesso diametro situate alle profondità a ed a', le portate Q e Q' dovranno soddisfare alla relazione:

$$Q:Q'=\sqrt{a}:\sqrt{a'}.$$

— 3°. Che prendendo un vase ABCD (Fig. 156), su cui sia lateralmente un foro chiuso dal cilindro D, che sulla faccia superiore, fatta di lamina sottilissima, porti un forellino che

si possa aprire a piacere dell'osservatore, lo zambillo che ne uscirà quando il vase sarà pieno di liquido, dovrà toccare l'altezza del livello interno. Nel fatto l'altezza riuscirà minore, ma ciò sarà e per le molecole che ricadendo ritardano il moto di quelle che salgono, e per la resistenza dell'aria; le quali due cagioni sono messe in evidenza dai seguenti fatti — 1°. Inclinando un poco la direzione del getto, si guadagna in altezza. — 2°. Per eguali altezze la differenza risulta minore pei getti di maggior diametro, e per diametri eguali la differenza è minore pei getti di minor altezza. — Or l'inclinazione del getto fa che le molecole che cadono non incontrino quelle che salgono; ed il maggior diametro che comparativamente al volume rende minore la superficie del getto, come la minore altezza che lo fa uscire con minor velocità, corrispondono appunto alla maniera di resistenza del mezzo, la quale cresce a norma della superficie e della velocità del mobile.

Pruove sperimentali del teorema di Torricelli.

168. Il 2° e 3° dei corollarii precedenti hanno offerto agl'idraulici i mezzi di provare l'esattezza del teorema di Torricelli. Mariotte in Francia, indi Guglielmini a Bologna e Poleni a Padova usarono di alti recipienti prismatici o cilindrici, sulle cui facce laterali stavano scolpiti dei fori a diversa profondità. I recipienti erano mantenuti costantemente pieni, e da ciascuno dei fori l'acqua si lasciava successivamente fluire per tempi eguali. Così essi trovarono che le distanze dei fori dalla superficie di livello seguendo le ragioni dei numeri 1, 4, 9, 16, ecc., le quantità di fluido sgorgato e quindi le velocità di afflusso erano proporzionali ai numeri 1, 2, 3, 4, ecc., vale a dire alle radici quadrate delle altezze.

Intanto Mariotte trovava dei risultamenti che divergevano da quelli calcolati per mezzo del teorema di Torricelli, quando la luce del foro non era piccolissima rispetto alle dimensioni del recipiente. E questa osservazione del fisico francese fu più tardi confermata dalle ricerche del Conte Mengotti che nelle sue sperienze usò di luci variabili tra $\frac{1}{5184}$ ed $\frac{1}{4}$ dell'area che aveva il fondo del recipiente. Dimodochè una luce piccolissima è condizione essenziale per la realtà del teorema di Torricelli.

Per vedere poi come dal 3° corollario ancora del n° precedente gl'idraulici abbiano tratto argomento per verificare lo stesso teorema, immaginiamo un recipiente prismatico o cilindrico (Fig. 157) tenuto costantemente pieno di acqua e che in una parete verticale porti scolpito un piccolo foro a. Il liquido nell'uscire da questo foro si troverà sottoposto all'azione della gravità che lo sollecita per la verticale am, ed alla pressione del liquido sovrastante che lo spinge orizzontalmente. Chiamando v la velocità prodotta dalla pressione del liquido, essa farebbe correre ad ogni molecola della vena lo spazio orizzontale vt nel tempo t, mentre la gravità la farebbe cadere nello stesso tempo per l'altezza $\frac{1}{2}gt^2$; quindi prendendo $ac=\frac{1}{2}gt^2$ e $ce=vt$, sarà e il luogo della molecola liquida al termine del tempo t. Or se facciamo $ac=x$ e $ce=y$, ed eliminiamo t dalle due equazioni $x=vt$, $y=\frac{1}{2}gt^2$, avremo:

$$gy^2=2v^2x\text{, donde } v=y\sqrt{\frac{g}{2x}}.$$

Quindi se il teorema di Torricelli è vero; dovrà essere:

$$y\sqrt{\frac{g}{2x}}=\sqrt{2ga},$$

a indicando l'altezza del liquido sulla luce del foro. Or da una serie di sperienze eseguite da Michelotti sopra una luce di $0^m,0271$ di diametro si ebbero i seguenti risultati.

ALTEZZA dell'acqua sul centro della luce	VALORI di x	VALORI di y	VALORI di $\sqrt{2ga}$	VALORI di $y\sqrt{\frac{g}{2x}}$
$2^m,20$	$6^m,28$	$7^m,53$	$6^m,70$	$6^m,60$
3 ,93	4 ,66	8 ,45	8 ,78	8 ,67
7 ,19	1 ,31	6 ,25	11 ,80	11 ,67

Da quali numeri si rileva che $y\sqrt{\frac{g}{2x}}$ è riuscito poco di-

verso da $\sqrt{2ga}$; e considerando che il valore della 1ª espressione è stato sempre minore del corrispondente valore della 2ª, e tanto più quanto più grande è stato quello di a ed in conseguenza quello della velocità prodotta, si vede chiaramente come la divergenza della velocità sperimentale dalla teorica sia stata prodotta dalla resistenza dell'aria, la quale scemando il valore di y ha fatto diminuire quello di $y\sqrt{\frac{g}{2x}}$.

Forma della vena liquida.

169. Il getto che si ha da un foro scolpito nella parete di un recipiente pieno di liquido, ha ricevuto dagl' idraulici il nome di *vena liquida*. Essa si compone di due parti distinte, l'una limpida ed immobile come un pezzo di cristallo, l'altra agitata e torbida, e che prima di dividersi in gocce presenta diverse espansioni e contrazioni, le quali poichè si osservano sempre negli stessi luoghi dimostrano esser la massa liquida stessa quella che soffre periodici cangiamenti di forma. Savart, a cui si debbono interessanti osservazioni sulla costituzione della vena liquida vide attraverso la parte torbida di una vena di mercurio delle linee che stavano segnate sopra un foglio di carta: la continuità della vena non era dunque che apparente. Egli conobbe ancora che la parte torbida della vena si compone di gocce distinte, sottoposte ad un movimento di vibrazione, pel quale ora si allungano secondo l'asse della vena, ora in direzione perpendicolare. E queste gocce non si staccano dalla parte limpida della vena, ma prendono origine nel foro di efflusso, ed a guisa di anelli scorrono sulla parte limpida, finchè l'aumento progressivo del loro volume non le obblighi a separarsi. Lo stato di vibrazione in cui si trovano, può rendersi sensibile facendo percuotere la vena contro una membrana tesa o altra lamina capace di vibrare, la quale rinforzandone l'effetto concederà di prenderne l'unisono; e così si renderà manifesto che il numero delle loro vibrazioni è nella ragion diretta della velocità di efflusso e nell'inversa del diametro del foro. Comunicando al recipiente un moto vibratorio sia per azione immediata, sia per l'intermedio dell' aria

ambiente, l'ampiezza dell'oscillazione delle gocce ne resta variata, imperocchè si osserva allora un notevole cangiamento nella vena: la sua parte limpida si accorcia, e le espansioni della parte torbida acquistano trasparenza e regolarità di forma. In una sperienza di Savart alla quale assisteva il Péclet, il suono di un violino che per avventura si trovava all'unisono delle vibrazioni della vena, fece scemare di oltre a 10 centimetri la lunghezza della sua parte limpida, quantunque il suono venisse così da lontano da essere appena sensibile.

Se in un recipiente pieno di acqua e che tenga scolpito nel fondo un piccolo foro che possa aprirsi o chiudersi a piacere dell'osservatore, si lascino cadere dei piccoli corpi alquanto più pesanti dell'acqua, come pezzetti di cera lacca o globetti di carta bagnata, si vedranno verticalmente scendere fino al fondo se il foro è chiuso, ma se questo fosse aperto, allora ad una certa distanza dal fondo si vedrebbero quei corpicciolî divergere dalla verticale e per linee curve convergenti dirigersi verso la luce di efflusso. Queste curve definiscono nella massa liquida una conoide che Giovanni Bernoulli denominò *gorgo*, e per la quale la superficie di livello del liquido, nel caso che il recipiente per l'efflusso si voti, presenta in vicinanza del fondo una cavità che Newton disegnò col nome di *cateratta*. Or la convergenza delle linee seguite dalle molecole liquide continuando oltre la luce del foro fa che la vena liquida abbia la forma di uno troncato, la cui base maggiore trovasi nella luce del foro, e la minore sta nel luogo del massimo ristringimento della vena (Fig. 155); e Newton che conobbe primieramente questo fatto, e ne vide l'influenza sulla portata dei recipienti, assegnò ai diametri *ab* e *cd* delle basi del cono troncato la ragione di $\sqrt{2}:1$. Indi Polèni, Michelotti, Bossut, Eytelwein ottennero diverse ragioni, la cui media è 0,8; dimodochè la ragione dell' area delle due basi è quella di 64 a 100. Così la portata teoretica che riusciva minore della sperimentale anche nel caso di luci piccolissime, per le quali regge il teorema di Torricelli, ha trovato nella contrazione della vena liquida il perchè della sua divergenza dal fatto, e nel fat-

tore 0,64 il mezzo per esserne corretta; dimodochè il vero suo valore sarà dato dall'equazione $Q=0{,}64ft\sqrt{2ag}$, in cui le lettere Q, f, t ed a hanno lo stesso significato precedente.

Influenza delle cannelle sulla portata e celerità dell'efflusso.

170. Si dà il nome di *cannelle* a quei tubi cilindrici e talvolta conici che si adattano ai recipienti dei liquidi per ottenerne l'efflusso quando si vuole.

Le cannelle accrescono le portate delle luci a cui sono applicate, quando il liquido n'esce riempendo tutta la cavità del tubo; e perciò bisogna che questo sia di sostanza capace di esser bagnato dal liquido, e che l'adesione tra i due corpi non sia impedita da cagione meccanica. Quindi si rileva perchè le cannelle di ferro non producano aumento di portata pei getti di mercurio, e quelle interiormente coperte di cera pei getti di acqua; e se in questi casi è l'azione molecolare che distacca la vena dalla faccia interna della cannella, lo stesso effetto potrà eziandio ottenersi meccanicamente, sia dando accesso all'aria esterna per uno o più fori scolpiti perpendicolarmente all'asse della cannella, sia accrescendo la celerità dell'efflusso con aumentare l'altezza dell'acqua nell'interno del recipiente.

Se le cannelle, soddisfacendo alle condizioni qui sopra esposte, accrescono la portata di una luce, ne fanno scemare nel tempo stesso la velocità di efflusso: l'aumento nella portata si è trovato facilmente misurando la quantità di liquido fluito in un dato tempo, e la diminuzione della velocità si è dedotta dall'ampiezza del getto parabolico (nº 168). E per comprendere sì le condizioni richieste per l'accrescimento della portata, che la coesistenza di questa colla diminuita velocità, gioverà premettere il seguente teorema dovuto a Daniele Bernoulli:

La pressione che un liquido esercita sopra un punto qualunque del tubo per cui corre, è eguale all'altezza del liquido sovrastante, meno quella a cui è dovuta la velocità che possiede in quel dato punto — Or essendo pel teorema di Torricelli $\frac{v^2}{2g}$ l'espressione dell'altezza a cui è dovuta la velocità v che il liquido ha in una data sezione del tubo, e chiamando a l'altez-

za del liquido ivi sovrastante e p la corrispondente pressione, avremo per questo teorema di Bernoulli:

$$p=a-\frac{v^2}{2g}.$$

Quindi se $\frac{v^2}{2g}$ fosse maggiore di a, p sarebbe negativa, vale a dire un'aspirazione da fuori in dentro. Laonde se in un punto qualunque di un tubo percorso da un liquido noi troviamo aspirazione da fuori in dentro, saremo allora certi che il liquido ha in quel punto una velocità maggiore di quella che vi produrrebbe la sola pressione del liquido sovrastante.

Ciò posto, se alla cannella di un recipiente pieno di acqua ed in vicinanza della sua origine, sia innestato un tubo che scendendo verticalmente vada a finire in un pozzetto di liquido colorato, vedremo questo elevarsi nel tubo nell'istante in cui la cannella sarà aperta. Vi è dunque aspirazione e quindi celerità maggiore di quella dovuta all' altezza del liquido sovrastante.

Erasi opinato che questo incremento di velocità nelle sezioni della cannella prossime all'origine dipendesse dalla contrazione sparita nella vena per opera della stessa cannella; ma un esperimento di Venturi dimostrò l'insussistenza di questo concetto, imperocchè da una cannella conformata secondo la vena contratta (Fig. 163) egli ebbe lo stesso aumento di portata che da una cannella cilindrica di eguali dimensioni. Nè l'opinione dello stesso Venturi, che nell'azione delle cannelle vedeva un semplice effetto della pressione atmosferica, è da seguirsi, stante che l'aumento di portata non cessa di aver luogo nel voto pneumatico, come Hachette ha osservato.

Essendochè la pressione della cannella non impedisce la contrazione della vena, a noi sembra che la vera cagione del fatto stia riposta nell' adesione della vena alla sostanza della cannella, dopo essersi attuata la contrazione. L' adesione comincerà dalla falda superficiale della vena, quando questa do-

po il massimo ristringimento comincia ad espandersi; e le molecole di quella prima falda aderendo alla faccia interna della cannella chiamano a sè quelle della seconda, le quali poi agiranno egualmente sulle molecole della terza falda, e così l'espansione per la forza coesiva delle molecole liquide si diffonderà dalla superficie all'asse della vena. E poichè la continuità di questa dipende unicamente dalla coesione del liquido, è facile comprendere come l'espansione patita dalla vena aspiri il liquido dal recipiente e l'obblighi a percorrere le sezioni della cannella vicine all'origine con una velocità maggiore di quella dovuta alla pressione del liquido sovrastante. Dal che poi si rileva e la ragione per cui l'aumento di portata richiegga una certa lunghezza di cannella, ed il modo col quale questo aumento possa conciliarsi con una reale diminuzione della celerità di efflusso.

Moto dell'acqua nei tubi.

171. Immaginiamo un tubo orizzontale assai lungo, adattato alla luce laterale di un recipiente mantenuto costantemente pieno di acqua, e che dopo un efflusso durato per un certo tempo si misuri la quantità della portata; dividendo questa quantità per l'area di sezione del tubo, ridotta secondo la ragione della vena contratta, si avrà la lunghezza del cilindro liquido che per quel dato tempo è passato pel tubo, e dividendo poi questa lunghezza pel numero dei secondi che ha durato il moto, si avrà la celerità dell'efflusso. Or l'altezza $\frac{v^2}{2g}$ a cui corrisponderà la velocità v così ottenuta, si troverà minore di quella che effettivamente ha il liquido sul centro della luce; e la differenza sarà tanto più grande, per quanto il tubo sarà più lungo e stretto.

Se il liquido è incapace di bagnare la sostanza del tubo, questa differenza è prodotta dall'attrito del liquido contro la faccia interna del condotto, e può giungere al segno d'impedirne l'efflusso: così il mercurio sotto una pressione di $0^m,0095$ cessa di scorrere da un tubo lungo $0^m,375$ e del diametro di $0^m,00112$. Ma se il liquido bagna la sostanza del tubo, la resistenza al moto sarà prodotta dalla coesione che alla falda liqui-

da aderente alla parete interna del condotto unisce il cilindro liquido che dentro vi scorre ; ed in questo caso , qualunque sieno la lunghezza e strettezza del tubo, il moto non cesserà giammai completamente , stante che l'attrazione del liquido alla faccia del condotto è sufficiente a menarlo innanzi.

172. I canali si distinguono dai fiumi per la loro costante sezione, per avere un fondo egualmente inclinato in tutta la sua lunghezza o per una gran parte almeno. Sia *ab* (Fig. 165) una retta tirata sul fondo di un canale parallelamente alle sponde, e sieno condotte l'orizzontale *bc* e la verticale *ac* ; il rapporto $\frac{ac}{ab}=p$ costituisce la pendenza del fondo. Moto dell'acqua nei canali.

Premesso ciò, supponiamo che la superficie libera del liquido scorrente sia parallela a quella del fondo, come suole avvenire quando il corso dell'acqua è già stabilito in un canale di pendìo costante , ed immaginiamo la massa liquida divisa in falde parallele al fondo ; sopra ciascuna di queste agirà la componente $g\frac{ac}{ab}$ della gravità, e quindi il moto del liquido dovrebbe riuscire uniformemente accelerato : intanto l'esperienza dimostra che il moto dell'acqua in un canale di costante pendìo diviene bentosto uniforme. Bossut avendo fatto correre dell' acqua in un canale lungo 200^m, del pendìo di 0^m,1 e sulla cui lunghezza aveva segnato dei punti di 33 in 33 metri; trovò che ad eccezione della prima, tutte le altre divisioni erano percorse in tempi eguali. La resistenza dunque che il liquido incontrava sia per attrito, sia per coesione alla falda liquida aderente alla superficie del canale, è stata sufficiente per distruggere l' accelerazione del moto. E per questa resistenza avviene che la celerità sia diversa nei varii fili della massa liquida in moto , trovandosi massima per le molecole che nella superficie sovrastanno alla maggiore profondità , e minima in quelle che corrono prossime alla faccia bagnata del canale.

173. Il moto può esser prodotto nei liquidi non solamente dalla gravità o da impulso, ma eziandio da forze molecolari. Endosmo.

Se in un tubo di vetro inferiormente chiuso con un pezzo di vescica si versi della soluzione di solfato di rame, e si lasci l'estremità chiusa del tubo per qualche giorno immersa in una massa di acqua, si troverà che il livello liquido si è innalzato nel tubo e l'acqua esterna si è leggermente tinta del colore della soluzione. L'aumentata quantità di liquido nel tubo e la colorazione dell' acqua dimostrano che attraverso i pori della vescica l' acqua è passata nel tubo ed un poco della soluzione n'è uscita. Se le due correnti fossero state di egual forza non si sarebbe ottenuta che la colorazione dell' acqua, ma poichè il livello liquido si è innalzato nel tubo, è chiaro che vi è penetrata una quantità di acqua maggiore della soluzione che n'è uscita. Con voci tolte dal greco queste due correnti sono state dette da Dutrochet *endosmosi* (corrente che entra) ed *esosmosi* (corrente che esce).

La cagione di questo fenomeno si rileverà facilmente qualora si consideri che vi bisognano due liquidi solubili l'uno nell'altro e separati da una lamina che sia inegualmente permeabile dai due liquidi. La solubilità, come forma speciale di attrazione molecolare tra due liquidi o tra liquido e solido, è quella che spinge le minime particelle di ciascuno dei due corpi a collocarsi tra quelle dell'altro, e da ciò prendono origine le due correnti attraverso i pori della membrana; la cui diversa permeabilità fa poi che uno dei liquidi passi in maggior quantità dell' altro. Così acqua e soluzione di zucchero, acqua ed alcool essendo liquidi solubili l' uno nell' altro, e le membrane di una vescica lasciando passar l'acqua più che l'alcool o la soluzione zuccherina, ne segue che quando con un pezzo di vescica sieno separati i liquidi di una coppia, l'acqua correrà verso l'altro liquido più che questo verso di essa. Quindi è che riempiendo di alcool un vasellino di vetro e tenendolo per alcune ore immerso nell'acqua dopo averlo bene chiuso con un pezzo di vescica, questa si troverà gonfia e tesa in modo che pugnendola con una spilla si vedrà uscir fuori uno zampillo di qualche decimetro. Per consimile cagione avviene che lo spirito si rettifica tenendolo lungamente conservato in

sacchetto di pelle; che le frutta conservate nello spirito assorbono molta parte alcoolica, e che l'epidermide delle ciliegie mature si laceri sotto la pioggia.

E novella pruova di questa spiegazione ce l'offre il fatto che l'endosmosi si rende più gagliarda per mezzo di quelle condizioni che valgono ad accrescere la mutua solubilità dei liquidi, quali sono per esempio una temperatura più alta, una soluzione più concentrata, ecc.

LIBRO QUINTO.

ACUSTICA.

CAPO PRIMO.

PRODUZIONE E CONDUZIONE DEL SUONO.

Obbietto dell'Acustica.

174. Il suono può considerarsi sotto tre aspetti differenti — 1° nella sua propria natura, ch'è quella di una sensazione — 2° nelle sue relazioni ai sentimenti che può eccitare nell'animo umano — 3° nella sua dipendenza dalla fisica costituzione dei corpi sonori.

Sotto il primo aspetto il fenomeno del suono vuol essere esaminato dai filosofi e dai fisiologi, pel secondo è del demanio della scienza musicale; e sotto il terzo aspetto soltanto è considerato dalla Fisica, che nel suono trova un istrumento per esplorare le leggi delle vibrazioni molecolari.

Produzione del suono.

175. Il suono, considerato fuor di noi, non è che un rapido movimento di vibrazione eccitato nelle molecole del corpo sonoro, e trasmesso al nostro orecchio per mezzo dell'aria o di altro veicolo. Poggiando un dito sopra una corda vibrante o sopra una campana appena toccata dal martello, avvertiamo un tremito che ci chiarisce del moto intestino a cui soggiace il corpo sonoro. Della sabbia sottile sparsa sopra una lamina elastica, si vedrà saltare quando la lamina sia messa in vibrazione strofinandone l'orlo con un arco di violino: in pari circostanze un liquido alquanto viscoso presenterebbe delle linee rilevate, simili alle onde che si alzano sulla superficie di un mare in burrasca.

176. Che il suono abbia bisogno di un veicolo per giungere al nostro orecchio, facilmente si dimostra con un esperimento pneumatico. Pongasi sotto la campana pneumatica uno scampanìo a molla, che mediante un bastoncino metallico donde la campana è traversata, può mettersi in movimento dopo avervi fatto il voto. Allora vedremo il martellino dello scampanìo battere sul corpo sonoro e nessun suono pervenire al nostro orecchio, purchè l'esperimento sia stato ben preparato. Fa d'uopo che la macchina possa fare il voto con sufficiente perfezione, e che sotto la campana sia posta anticipatamente qualche sostanza disseccante che assorbisca il vapore acqueo non aspirato dagli stantuffi. Bisogna inoltre che lo scampanìo sia poggiato sopra un soffice cuscino, per impedire che la trasmissione del suono avvenga per mezzo del sostegno, stante che i solidi trasmettono i suoni meglio che l'aria; ed è perciò che adaggiando l'orecchio ad una delle estremità di una lunga trave si sentirà chiaramente il piccolo rumore prodotto collo strofinare la punta di una spilla sull'altro estremo. Conduzione.

177. La trasmissione del suono non è istantanea ma successiva. Osservando a sufficiente distanza lo sparo di un'arma da fuoco, si veggono il fumo e la fiamma prima di udire il colpo; ed altrettanto avviene nello scoppio del fulmine che tra il lampo ed il tuono presenta un intervallo di tempo più o meno grande a norma della distanza dell'osservatore dal luogo della scarica. Modo della conduzione.

Questi fatti che chiaramente ci dimostrano la successiva propagazione del suono, trovano la loro ragione nel modo stesso con cui il suono si trasmette. Sappiamo già che la sua genesi sta in un moto vibratorio delle molecole del corpo sonoro; vale a dire in un moto pel quale le molecole, simili ad altrettanti pendoli in azione, corrono da un lato e dall'altro delle loro posizioni di equilibrio. In questo movimento esse comprimono la falda del mezzo contro cui si spingono, e la lasciano in vece vieppiù dilatarsi allorchè retrocedono; e queste fasi di condensamento e successiva espansione comunicandosi da una falda all'altra del mezzo ambiente, il suono vi si propaga e lo percorre con una certa velocità.

Onda sonora.

178. Da ciò che prende si rileva che sulla linea percorsa dal suono vi son sempre due falde contigue del mezzo conduttore, di cui l'una è condensata e l'altra è rarefatta. La loro unione costituisce l'*onda sonora* e la somma delle loro spessezze forma la *lunghezza* dell'onda. Queste fasi si succedono di falda in falda del mezzo conduttore, ed il loro procedere costituisce il moto del suono.

Celerità del suono.

179. Newton trovò per la prima volta che la velocità del suono dipende dall'elasticità e densità del mezzo conduttore mercè la semplicissima relazione:

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}},$$

nella quale v indica la velocità, e e d rappresentano l'elasticità e densità del mezzo conduttore. Da questa formola si rileva :

— 1°. Che in un mezzo di costante elasticità e densità il moto del suono debba essere uniforme. Quindi se in un mezzo consimile immaginiamo un centro a di vibrazione (Fig. 175), l'alterno moto di condensamento e rarefazione, che costituisce l'onda sonora, dovendosi trovare nello stesso tempo in d, e, ecc. ad eguali distanze dal centro di moto, la forma dell'onda sonora sarà necessariamente quella di una falda sferica che andrà crescendo di raggio come si farà più lontana dal corpo sonoro.

Donde poi risulta che l'impulsione primitiva del corpo sonoro trasfondendosi nel mezzo ambiente per superficie sferiche sempre più grandi, produrrà sopra ciascuna di esse un'oscillazione molecolare altrettanto meno ampia, e quindi l'intensità del suono nella stessa ragione sarà decrescente. Ma le superficie sferiche seguono la ragione dei quadrati dei loro raggi; dunque l'intensità del suono dovrà essere inversamente proporzionale al quadrato della distanza del corpo sonoro. Quindi si comprende perchè i suoni rapidamente decrescano d'intensità coll'aumentarsi della distanza, e cessino bentosto di essere udibili.

Ma se il suono, anzichè potersi liberamente diffondere nello spazio ambiente, fosse costretto a correre uno spazio cilindrico ovvero conico, allora nel primo caso avrebbe un' intensità costante; e nel secondo se movesse dalla base verso il vertice del cono, acquisterebbe una forza crescente, e se viceversa procedesse dal vertice alla base, la sua energia quantunque tuttavia sottoposta alla legge di diminuzione secondo i quadrati delle distanze, soffrirebbe non pertanto in valore assoluto assai meno che nel caso di una libera espansione. La prima di queste due ipotesi sul moto del suono in uno spazio conico ci fa comprendere gli effetti del *cornetto acustico*, la seconda quelli del *portavoce*.

— 2°. Che nell'aria, la cui forza elastica è proporzionale alla pressione quando la temperatura è costante, la celerità del suono dev'essere indipendente dall' altezza barometrica, e dipendente invece dal suo grado di calore. Ed in vero, un cangiamento nell'altezza barometrica dovendo far variare nella stessa ragione la forza elastica e la densità dell'aria, conserverà necessariamente immutata la frazione $\frac{e}{d}$, e quindi la velocità del suono; al contrario un accrescimento di temperatura farà aumentare e e diminuire d, e se il grado di calore si abbassa vi sarà viceversa diminuzione di e ed aumento di d.

— 3°. Che la velocità del suono debba essere indipendente dalla durata di ciascuna vibrazione del corpo sonoro, stantechè nell'espressione matematica che la rappresenta, non entrano altre quantità che la forza elastica e la densità del mezzo. Or nel Capo seguente vedremo che i suoni gravi sono prodotti da vibrazioni più lente di quelle che danno origine ai suoni acuti; se dunque la celerità del suono è indipendente dalla durata di ciascuna vibrazione del corpo sonoro, i suoni gravi e gli acuti dovranno percorrere lo spazio con eguali velocità.

180. Una prima misura diretta della celerità del suono nell'aria fu eseguita dagli accademici del Cimento; fu poi ripetuta in altri luoghi, ed in Francia se n'ebbe una nel 1738 ed Pruove sperimentali.

un'altra nel 1822. Calcolando la velocità per mezzo del tempo decorso dall'istante dell'apparizione della fiamma nello sparo di un cannone e l'istante in cui il suono perveniva all'orecchio di un osservatore situato ad una distanza conosciuta, si è trovato — 1° che il movimento del suono è realmente uniforme — 2° che lo stato sereno o nuvoloso del cielo, una pressione atmosferica più o meno grande, non hanno influenza sulla celerità del suono, purchè l'aria sia calma; ma che l'azione del vento l'aumenta o diminuisce (secondochè è cospirante o contraria) di quanta è la componente della sua velocità nel senso della retta che unisce il centro sonoro al luogo occupato dall'osservatore. E quanto all'indipendenza della celerità del suono dall'altezza barometrica gioverà conoscere che gli accademici francesi andati al Perù per misurarvi un arco del meridiano terrestre, trovarono che a Quito, dove il barometro saliva appena a $0^m,55$ il suono aveva la stessa celerità che a Parigi sotto la pressione $0^m,76$. — 3° che la celerità del suono varia secondo una certa ragione della temperatura.

Verificate così le principali deduzioni della formola di Newton, passiamo a vedere come essa riproduca il valore sperimentalmente trovato della velocità del suono nell'aria. Perciò fa d'uopo trovare le corrispondenti espressioni numeriche di e e d. Rispetto alla prima osserviamo che l'elasticità dell'aria facendo equilibrio all'altezza barometrica, dovrà essere espressa da ag, a indicando l' altezza del barometro e $g=9,809$ la forza di gravità. La sua densità poi alla temperatura 0° e sotto la pressione a è $\frac{a}{0^m,76} \cdot \frac{1}{10466,82}$ di quella del mercurio. Sostituendo questi numeri nella formola di Newton, e considerando che da 0° a $t°$ la forza elastica dell'aria si accresce nel rapporto $1+\alpha t : 1$, α indicando il suo coefficiente di dilatazione, avremo che alla temperatura di t gradi la velocità del suono nell'aria dovrà essere rappresentata da:

$$v = \sqrt{0^m,76 \,.\, 9,809 \,.\, 10466,82(1+0,003665t)}.$$

Applicandola al caso della temperatura di 15°,9 per la quale i Commessarii dell'Ufficio delle Longitudini in Francia trovarono la velocità di 340^m,89 a minuto secondo, si avrà: $v=287^m,35$. Vi è dunque una differenza di 53^m,54 tra il valore sperimentale ed il teoretico. Laplace ha fatto conoscere che questa differenza dipende dal non essersi considerato il calore svolto nel condensamento che l'aria patisce per la conduzione del suono, e che perciò manca alla formola il fattore $\sqrt{\frac{c}{c'}}$ (n° 94). Or essendo prossimamente $\frac{c}{c'}=1,4$, si ha:

$\sqrt{\frac{c}{c'}}=1,1832$; ed aggiungendo questo fattore al numero 287^m,35 che ci ha dato la formola, si avrà $v=340^m$.

Questo concetto di Laplace, abbastanza giustificato dall'esser l'onda condensata quella che trasporta il suono, è stato messo alla seguente pruova da Biot. Questi fece il voto in una campana pneumatica che racchiudeva una soneria a molla, e quando non si udiva più suono per l'estrema rarefazione dell'aria, mediante un rubinetto annesso alla campana vi fece cadere parecchie gocce di un liquido volatile: allora il suono ricomparve, e certamente per mezzo del vapore diffuso nella campana. Or se il vapore, di cui quello spazio era già saturo, non avesse sviluppato del calore nell' atto della trasmissione del suono, la compressione per questo avvenuta lo avrebbe liquefatto, ed il suono non sarebbe uscito fuori della campana.

Se per l'aria l'elasticità e è data dal peso ga della colonna mercuriale a cui fa equilibrio, per l'acqua essa sarà data dalla relazione della forza premente alla riduzione di volume che n'è l'effetto. Or dalle sperienze di Colladon e Sturm, di cui tra poco parleremo, risulta che l'acqua sotto la pressione di 0^m,76 di mercurio si comprime di 0,0000495 del suo volume; sarà dunque:

$$e=\frac{0^m,76\times 9,809}{0,0000495},$$

e poichè per l'acqua rispetto al mercurio si ha $d=\frac{1}{13,598}$, così avremo:

$$v=\sqrt{\frac{0^{m},76\times9,809\times13,598}{0,0000495}}=1431^{m}.$$

Intanto dalle sperienze fatte sul lago di Ginevra dagli stessi Colladon e Sturm risulta che il suono percorre nell'acqua 1435 metri a secondo; e questo risultato si ebbe nel seguente modo. Furono ancorati sul lago due battelli alla distanza di 13487 metri; ad uno dei battelli stava sospesa nell'acqua una grande campana, nell'altro stavano gli osservatori. Il martello, che doveva percuotere la campana per la produzione del suono, era fermato all'estremità di un braccio di leva, l'altro estremo della quale dava fuoco nel medesimo istante della percossa ad un poco di polvere; così dall'apparizione della fiamma conoscevano il momento in cui il suono partiva, e che essi udivano per mezzo di un tubo allargato nell'estremo che pescava nell'acqua, ed ivi terminato da una faccia piana, normale alla direzione del suono.

Or se la piccola differenza tra la celerità calcolata del suono nell'acqua e quella ottenuta dall'esperienza, la poniamo a confronto coll'insensibile svolgimento di calore che si ha dalla compressione dell'acqua, avremo un nuovo criterio di realtà pel concetto di Laplace sulla correzione della formola newtoniana; imperocchè questa formola che rispetto all'aria, la quale compressa svolge molto calore, ci dà un risultato presso che di un quinto minore del vero, riproduce poi quasi che esattamente il dato sperimentale della celerità del suono nell'acqua che compressa non isvolge sensibilmente calore.

Osserviamo in ultimo come alcune sperienze fatte da Biot sopra una serie di tubi, destinati a servire d'acquidotto per la città di Parigi, viemeglio rifermassero la realtà dell'esposta teoria del suono. Biot situandosi ad un estremo della serie dei tubi, lunga 951 metri, dirigeva la parola all'osservatore che trovavasi all'altro estremo, ed ogni dimanda ch'egli face-

re, riceveva la sua risposta dopo $5^s,58$ sessagesimali, che il suono impiegava in percorrere due volte la serie dei tubi, vale a dire una lunghezza di 1902 metri. Volle provare à qual grado infimo dovesse scendere la voce, perchè la parola non giungesse all'altro estremo, ma non potè riuscirvi, stante che delle dimande fatte con voce così bassa come quella che usiamo parlando all'orecchio di un altro, furono intese all'altro capo dell'acquidotto ed ebbero la loro risposta: realmente dunque il suono che cammina per un tubo conserva inalterata la sua energia. Scaricando una pistola prossimamente ad un estremo della serie dei tubi, nell'altro estremo si ebbe come un impeto di vento, pel quale dei corpi leggieri furono lanciati via, e la fiamma di una candela ne rimase spenta. L'indipendenza della celerità del suono dalla quantità di vibrazioni fatte in un dato tempo dal corpo sonoro, venne ancora verificata; un motivo eseguito da un flauto presso un estremo della serie, si udì invariato nell'altro estremo; la qual cosa dimostrava che i suoni gravi e gli acuti si muovono colla stessa celerità.

181. Se lungo la via percorsa dal suono l'elasticità e densità del mezzo fossero continuamente varie, l'onda sonora ne riceverebbe una continua alterazione di forma, senza però desistere dal suo moto progressivo; ma se nell'elasticità e densità del mezzo avvenisse un salto, come nella superficie di separazione di due mezzi diversi, allora l'onda sonora ne sarebbe rimbalzata a modo di una palla elastica. Poniamo che sia in *o* (Fig. 176) un centro di vibrazione ed in *ab* la superficie di separazione di due mezzi: considerando la serie delle successive condensazioni e rarefazioni sopra una delle rette o *raggi sonori* che partono dal centro *o*, e sia *om*, avremo che quando la semionda condensata sarà giunta in *m*, la componente normale *hm* del suo moto sarà distrutta dalla resistenza del secondo mezzo e poi riprodotta dall' elasticità del primo nell'opposta direzione *mh*; e questa nuova componente *mh* combinandosi colla componente tangenziale *zm* del moto incidente, la quale rimane invariata nell'urto, darà un moto ri- Riflessione del suono.

sultante nella direzione *ms*, inclinata alla normale *mh* di quanto lo era la linea d'incidenza *om*. Or se *ms* si protragga in *o'* fino ad incontrare il prolungamento della *oz* normale ad *ab*, è chiaro che i punti *o* ed *o'* si troveranno ad eguali distanze da *ab*, e che il moto prodotto dalla riflessione in *m* procederà come se avesse cominciato da *o'*. Ed avvenendo altrettanto per ogni punto della superficie *ab*, ne segue che l'onda riflessa non è che la continuazione dell'onda incidente, e perciò un osservatore situato in *s* udirebbe prima il suono diretto secondo *os*, indi il suono riflesso in *m*, ossia lo stesso suono dopo aver fatto il cammino *oms*.

Quindi si rileva come due persone situandosi nei fuochi *z* *z'* (Fig. 177) di un recinto ellittico possano tra loro conversare a voce così bassa da non potersi udire in verun altro punto di quello spazio; imperocchè dalla proprietà geometrica che i raggi vettori *zm* e *z'm* sono egualmente inclinati alla normale in *m*, risulta che le onde sonore generate in *z* debbono necessariamente concentrarsi in *z'*, dimodochè *z* e *z'* saranno punti di massima intensità sonora e lo saranno essi soli. Weber ha trovato un mezzo semplicissimo per rendere visibile questa proprietà acustica dei recinti ellittici: un vase cilindrico a base di ellisse è in parte pieno di mercurio, e sopra uno dei fuochi della superficie di livello cade una vena sottilissima dello stesso liquido; numerose onde se ne vedranno partire, e poi tutte riunirsi nell'altro fuoco dopo essersi riflesse sulla faccia interna del recipiente.

Negli sperimenti fatti sul lago di Ginevra, Colladon e Sturm osservarono che stando il corpo sonoro a piccola profondità sotto il livello dell'acqua e l'osservatore non molto lontano dal centro di vibrazione, il suono riusciva assai distinto nell'aria, ma diminuiva poi rapidamente di forza a misura che l'osservatore si allontanava, dimodochè più non si avvertiva ad una distanza di circa 300 metri, quantunque l'orecchio si tenesse prossimo alla superficie del liquido. E poichè attraverso di questo il suono era tuttavia intenso, è chiaro che le sue onde non passavano nell'aria, perchè erano riflesse dalla superficie

limite dei due mezzi in tanta maggior copia per quanto era minore l'angolo sotto cui la incontravano. Vedremo in appresso che un fenomeno consimile ha luogo nel passaggio della luce per la superficie di separazione di due mezzi diversamente rifrangenti.

Cagione della maggior forza dei suoni notturni.

182. È un fatto di antichissima osservazione che di notte i suoni si possono udire a maggior distanza che di giorno; e di ciò si trovava soddisfacente ragione nell' ordinario silenzio della notte. Ma quando Humboldt osservava che lo stesso fatto si riproduce nelle foreste dell'Orenoco, in cui viceversa il silenzio non ha luogo che durante il giorno, bisognò cercarne altra cagione. Humboldt osservò ancora che il fenomeno è più sensibile nelle basse pianure che su i rialti, più su i continenti che sul mare. Or per le basse pianure rispetto agli altipiani, e pei continenti in comparazione del mare è anche più grande la differenza di temperatura tra il giorno e la notte; e da questa analogia tra i due fenomeni si venne a scovrire che nel secondo sta la ragione del primo. Ed in vero una maggior differenza di temperatura tra il giorno e la notte fa che sia anche più grande quella che nelle ore diurne ha luogo nei gradi termometrici del suolo e dell'aria sovrastante; e quanto più il suolo è caldo rispetto all' aria che gli sta sopra, tanto più forti divengono le correnti dell'aria calda che sale per dar luogo all'aria fredda che discende. Or nell'incontro di queste due correnti vi è un salto nella densità del mezzo, ed ivi l' onda sonora soffre delle parziali riflessioni, le quali scemandone l'energia fanno che più presto divenga insensibile. Come poi il sole scende sotto l'orizzonte la differenza di temperatura tra la superficie terrestre e l'aria che vi sta sopra, va diminuendo fino ad annullarsi per quindi progredire in senso opposto; così le correnti da prima diminuite cessano poi del tutto, e l'onda sonora non più soggetta a successive perdite per causa di riflessione, conserva bastante energia a maggior distanza.

Rifrazione del suono.

183. Rappresenti *ab* (Fig. 166) la superficie di separazione di due mezzi A e B, il primo dei quali conduca il suono più celeramente del secondo; e siano *mo*, *ns* due raggi sonori ab-

bastanza vicini perchè si possa considerare come piana la porzione *oe* della superficie dell'onda. Essendo per ipotesi la celerità del suono in B minore di quella in A, il cammino *oe* che il suono farà in B dovrà esser minore del cammino *cs* che nel medesimo tempo percorre in A; e poichè il cammino *oe* deve ancora soddisfare la condizione di esser normale alla superficie *se* dell'onda che passa pel punto *s*, così è d'uopo che *oe* si avvicini alla normale *xy* condotta pel punto d'incidenza *o*, più che non faccia il raggio *mo*. Se viceversa la celerità del suono fosse in A (Fig. 167) minore che in B, il cammino *oe* risulterebbe maggiore di *cs*, ed *oe* più che *mo* si allontanerebbe dalla normale *xy* al punto d'incidenza. Laonde:

I raggi sonori passando da un mezzo in un altro di diversa conducibilità si rifrangono, *e vieppiù si avvicinano o si allontanino dalla normale al punto d'incidenza, secondochè la celerità del suono è nel mezzo che lasciano, maggiore o minore di quella del mezzo che incontrano.*

Or tra i due angoli *i* ed *r* (Fig. 166 e 167) che il raggio incidente *mo* ed il raggio rifratto *oe* formano colla normale *xy* al punto *o* d'incidenza, esiste una notevole relazione. Ed in vero, essendo l'angolo $i = cos$ e l'angolo $r = ose$, sarà:

$$\text{sen}\, i : \text{sen}\, r = cs : oe.$$

Ma gli spazii *cs* ed *eo*, perchè descritti in un medesimo tempo, sono proporzionali alle velocità *u* e *v* che il suono ha nei mezzi A e B; sarà dunque:

$$\text{sen}\, i : \text{sen}\, r = u : v.$$

E considerando che *u* e *v* essendo costanti, tale ancora dev'esser il loro rapporto, ne segue che:

Nella rifrazione del suono il rapporto del seno d'incidenza a quello di rifrazione è costante per due mezzi dati.

Tutti questi risultamenti teoretici sono stati confermati dalle belle sperienze di Hajech, eseguite con tubi di vetro di varia lunghezza e del diametro di 77 millimetri, chiusi da sottili lamine diversamente inclinate all'asse del tubo. Il

tubo era messo a pruova incastrandolo in un foro fatto nel muro di separazione di due sale contigue, in una delle quali si trovava l'osservatore, nell'altra l'apparecchio sonoro, che consisteva in un campanello messo in azione con un meccanismo di orologeria e chiuso in una cassa dalla quale partiva un tubo che s'innestava in quello dell'esperimento. Dal lato di questa congiunzione il tubo che attraversava il muro era chiuso da una lamina perpendicolare al suo asse, nell'altra estremità poi la lamina era obbliqua all'asse ma verticale: così i raggi sonori paralleli all'asse del tubo che partiva dalla cassa, incontravano normalmente la prima lamina, e camminando tuttavia paralleli nel secondo tubo, andavano ad incontrare in direzione obbliqua l'altra lamina. In questo modo era nota la direzione dei raggi incidenti, e per misurare l'angolo che essi facevano coi raggi rifratti la cui direzione veniva fissata cercando il luogo della sala in cui si udiva più intenso suono, stava descritto sul pavimento un cerchio graduato il cui centro stava nella proiezione del centro della lamina obbliqua all'asse del tubo. Furono così messi a pruova diversi gas, l'acqua ed una soluzione satura di potassa, e si ebbero i seguenti risultati:

— 1°. Ogni volta che il tubo fu riempito di aria atmosferica, non si ebbe alcuna rifrazione, sotto qualunque incidenza.

— 2°. Neppure vi fu rifrazione quando la seconda membrana era normale all'asse del tubo egualmente che la prima, di qualunque gas o liquido fosse ripieno il tubo.

— 3°. In ogni altro caso la rifrazione ebbe luogo, e l'*indice* di essa, ossia il rapporto del seno d'incidenza a quello di rifrazione riuscì sempre eguale a quello delle velocità del suono nei due mezzi; come può rilevarsi dalla seguente tavola.

FLUIDI MESSI A PRUOVA.	ANGOLO D'INCIDENZA.	ANGOLO DI RIFRAZIONE.	
		osservato.	calcolato.
Idrogeno	35°,50′	8°,00′	8°,50′
Id.	25 ,00	7 ,00	6 ,22
Gas ammoniaco	41 ,00	29 ,20	30 ,22
Id.	35 ,50	25 ,00	26 ,50
Gas d'illuminazione. . . .	35 ,50	25 ,40	»
Acido carbonico	35 ,50	49 ,50	48 ,19
Id.	25 ,00	33 ,20	32 ,33
Acido solforoso	35 ,50	62 ,30	61 ,20
Id.	25 ,20	40 ,00	39 ,24
Acqua di fiume	35 ,50	7 ,40	7 ,58
Id.	25 ,00	5 ,00	5 ,37
Soluzione satura di potasso . .	35 ,50	6 ,15	»
Id.	25 ,00	5 ,10	»

— 4°. La lunghezza del tubo ed il grado più o meno elevato del suono non ebbero alcuna influenza.

Oltre a ciò Hajech ha riprodotto nei suoni gli effetti delle lenti sui raggi luminosi. Egli ha concentrato i suoni in un fuoco, ora usando lenti convesse piene di un fluido in cui il suono va meno celere che nell'aria, tal che l'acido carbonico e l'acido solforoso, ed altra volta servendosi di lenti concave piene di un fluido, tal che l'acqua e l'idrogeno, in cui il suono è più celere che nell'aria.

Compressibilità dei mezzi conduttori del suono.

184. Da ciò che abbiamo finora esposto sulla fisica costituzione delle onde sonore, chiaramente apparisce che ogni corpo capace di condurre il suono debba essere un corpo compressibile. È nota la somma facilità con cui l'acqua trasmette i suoni; l'acqua dunque deve scemare di volume sotto l'azione di una forza premente. Gli accademici del Cimento furono i primi a cercar direttamente la compressibilità dell'acqua: essi la chiusero in un globo di oro, che sottoposero a forti colpi di martello; ma l'acqua trapelò pei pori del metallo, prima che il globo avesse presentato una riduzione del suo volume.

Primo ad eseguire sperimenti che mostrassero direttamente la compressibilità dell'acqua fu Canton nel 1761. Egli prese

un tubo da termometro, ne divise il cannello in parti di eguali capacità, e determinò il loro rapporto alla capacità della pallina, affine di poter valutare il volume dell'acqua di cui andava a riempirlo. Preparato così il tubo, ne immerse la pallina e porzione del cannello in una massa di acqua, affinchè il calore che poteva eccitarvi la pressione fosse rapidamente assorbito. Questo apparecchio veniva chiuso in un recipiente, in cui addensando fortemente l'aria, si vedeva l'acqua scendere un poco nel cannello. Era questa una chiara dimostrazione della compressibilità dell'acqua, stante che sotto la pressione a cui soggiaceva il cannello sì nella faccia esterna che nell'interna, la sua capacità interna diveniva minore ; ed in conseguenza se l'acqua non avesse patita una riduzione di volume più grande di quella avvenuta nella capacità del tubo, essa in vece di scender avrebbe dovuto elevarsi.

Conosciuta la compressibilità dell'acqua, se ne volle definire la quantità, e Canton, Perkins ed Œrsted se ne occuparono successivamente. Perkins sperimentava con un apparecchio di sua invenzione da lui denominato *piezometro*. Era questo un forte tubo metallico AB (Fig. 178) chiuso da un coperchio a vite pel quale passava a strofinio il piccolo cilindro *cd*, sul quale era mobile l'anello *e* destinato a servire da indice. Perkins chiudeva questo apparecchio in un forte cannone di ferro fuso, ed ivi lo sottoponeva alla pressione di 100 atmosfere : così il cilindro *cd* vieppiù penetrava in AB già pieno di acqua, l'anello scorreva verso *c* , e dal cammino che mostrava di aver fatto durante la pressione sofferta interiormente dal piezometro, Perkins deduceva la diminuzione di volume avvenuta nell'acqua, ch'egli trovava eguale a 0,000026 del volume primitivo sotto la pressione di un'atmosfera. Ma non tardò a conoscere che il modo con cui l'asta penetrava nel piezometro rendeva dubbii i risultamenti ; e perciò vi sostituì una valvoletta mobile da fuori indentro, la quale se permetteva all'acqua di penetrare nel piezometro sotto una forte pressione, ne impediva l'uscita quando la pressione era cessata. Così la diminuzione del volume primitivo si argomentava dal-

l'accresciuto peso del pizometro; e con questo secondo metodo Perkins trovò che sotta la pressione di un' atmosfera l' acqua si contrae di 0,000048 del suo primo volume.

Nuove ricerche sulla compressibilità dell'acqua e di altri liquidi furono fatte nel 1823 da Œrsted col piezometro rappresentato nella fig. 179. Si compone di un forte recipiente *a* di vetro, terminato dal tubo capillare *c*, diviso in parti di eguali capacità e di cui si è definito il rapporto alla capacità del recipiente: questo e buona parte del tubo sono pieni del liquido su cui si vuole sperimentare; e sulla sommità della colonna sta la goccia *m* di mercurio ad uso d'indice. Sulla tavoletta a cui sta fisso il descritto apparecchio evvi ancora un tubo *b* chiuso superiormente e destinato a servire da manometro ad aria compressa, quando immerso nel cilindro *a* (Fig. 180) di cristallo, e riempito questo di acqua, si viene a circoscrivere il volume di aria naturalmente contenuto in *b*. Sull'acqua del cilindro poggia lo stantuffo *m* della tromba *l*, la quale fa fuggire pel foro *i* quel poco di aria che incontra nella sua base, e riceve per l'imbuto *g* l'acqua di cui può aver bisogno.

Tutte le ricerche finora indicate, poichè della diminuzione di capacità del piezometro non si tenne conto, necessariamente dovevano menare a valori di compressibilità minori del vero. I primi a prenderla in considerazione furono Colladon e Sturm, i quali la dedussero dall'allungamento che soffriva un cilindro dello stesso vetro del piezometro, quando era tratto da un peso conosciuto. Essi sostituirono alla vite *s* del piezometro di Œrsted una tromba premente, e usarono di un cilindro abbastanza forte purchè regesse a pressioni crescenti fino a 24 atmosfere. Così ebbero i valori segnati nella seguente tavola che contiene ancora i risultamenti ottenuti da Œrsted.

Nomi delle sostanze.	Compressibilita' per un'atmosfera, valutata in millionesimi del volume primitivo.	
	Colladon e Sturm.	Œrsted.
Mercurio	3,38	2,65
Acido solforico	30,35	»
Acido nitrico	30,55	»
Solfuro di carbonio	»	31,65
Ammoniaca	33,05	»
Acido acetico	40,55	»
Acqua non privata di aria	47,85	»
Acqua privata di aria	49,65	46,45
Etere nitrico	69,85	»
Essenza di terebentina	75,35	»
Etere acetico	77,65	»
Etere idroclorico	84,25 per la 1ª atm.ª	»
id.	80,69 per la 9ª.	»
Alcool	94,95 per la 1ª	21,65
Id.	91,85 per la 9ª	»
Id.	87,35 per la 24ª	»
Etere solforico a 1°	131,35 per la 1ª	61,65
Id.	120,45 per la 24ª	»
Id. a 11°	180,35 per la 1ª	»
Id.	139,35 per la 24ª	»

CAPO SECONDO.

MISURA DEI SUONI.

185. Se ad una morsa fermiamo una lamina elastica per uno dei suoi estremi, e dopo averla curvata per l' altro estremo l'abbandoniamo a se stessa, vedremo che prima di ridursi all'equilibrio farà delle oscillazioni che si potranno numerare e non daranno verun suono, se la lamina sia abbastanza lunga. Ripetendo più volte questo sperimento e facendo che ad ogni volta la lamina abbia minor lunghezza, si troverà che il numero delle oscillazioni fatte in un dato tempo andrà crescendo;

Relazione tra il numero di vibrazioni ed il grado del suono.

e quando esse saranno divenute abbastanza celeri per produrre un suono, vedremo questo divenir più acuto, come la lamina rimarrà più corta, ed in conseguenza come più celeri saranno le sue oscillazioni. Vi è dunque una stretta dipendenza tra il grado del suono ed il numero di vibrazioni fatte dal corpo sonoro in un dato tempo.

Prendendo ad esempio le corde sonore, il calcolo ha trovato tra la lunghezza l della corda, il suo raggio r, la sua densità d, il peso p equivalente alla sua tensione ed il numero n di vibrazioni fatte in 1^s, la relazione:

$$n=\frac{1}{lr}\sqrt{\frac{pg}{d\pi}},$$

g disegnando la forza di gravità e π il rapporto della circonferenza al diametro. Da questa formola si rileva:

— 1°. Che per una stessa corda il numero n di vibrazioni fatte in un secondo, sarà in ragione inversa della sua lunghezza ed in ragion diretta della radice quadrata della tensione — 2°. Che per corde della stessa natura, i numeri di vibrazioni saranno in ragione inversa dei loro diametri, quando tutte le altre cose siano eguali; e che in questa medesima ipotesi i numeri di vibrazioni seguiranno la ragione inversa delle radici quadrate delle densità, quando le corde sono eterogenee.

Valori numerici dei suoni della gamma.

186. Posto che per una stessa tensione i numeri di vibrazioni fatte da una corda in un dato tempo, debbano seguire la ragione inversa della sua lunghezza, è facile determinare i rapporti numerici della gamma musicale. Serve a ciò l'istrumento denominato *sonometro*, il quale è composto di una cassa sonora su cui sta tesa una corda tra due punti fissi, e la cui lunghezza può diminuirsi a piacere premendola contro un ponticello, mobile sopra una linea divisa in millimetri e segnata sul fondo superiore della cassa in direzione parallela alla corda. Fatta vibrar questa in tutta la sua lunghezza, si prenda il suono prodotto pel *do* della gamma naturale: indi si fermi il ponticello a tal punto della linea, d'averne il suono *re*, e si prenda nota delle parti della linea che si comprende-

ranno nella lunghezza della parte vibrante della corda: si faccia altrettanto pei suoni *mi*, *fa*, ecc. , e si troverà che prendendo ad unità la lunghezza della corda che ha dato il suono fondamentale *do*, le lunghezze relative agli altri suoni della gamma saranno dati dalla serie che segue:

$$\begin{array}{lcccccccc} \text{Suoni} & do, & re, & mi, & fa, & sol, & la, & si, & do \\ \text{Lunghezze} & 1, & \frac{8}{9}, & \frac{4}{5}, & \frac{3}{4}, & \frac{2}{3}, & \frac{3}{5}, & \frac{8}{15}, & \frac{1}{2}. \end{array}$$

E poichè in ragione inversa di queste lunghezze debbono essere i corrispondenti numeri di vibrazioni, così prendendo ad unità il numero di vibrazioni da cui risulta il *do* fondamentale, avremo pei numeri di vibrazioni degli altri suoni la serie:

$$\begin{array}{cccccccc} do, & re, & mi, & fa, & sol, & la, & si, & do \\ 1, & \frac{9}{8}, & \frac{5}{4}, & \frac{4}{3}, & \frac{3}{2}, & \frac{5}{3}, & \frac{15}{8}, & 2. \end{array}$$

187. La scienza deve a Cagnard Latour l'invenzione di un istrumento, il quale concedendo di poter definire il numero assoluto di vibrazioni da cui risulta un dato suono, ha offerto un mezzo di verificare la realtà del 1° corollario della formola del n° precedente. L'istrumento è denominato *sirena*, perchè può suonar sott'acqua; ed è rappresentato nella fig. 181. Si compone di una cassa cilindrica di rame A, del diametro di 8 a 10 centimetri e di 3 di altezza: sul fondo superiore *cc'* perfettamente piano poggia l'asse *g*, ritenuto nell'altro estremo dalla traversa *n*; al fondo inferiore è annesso il tubo B pel quale va introdotta una corrente di aria o di acqua. L'asse *g* porta una vite perpetua *i*, che ingrana colla ruota *m'* la quale ha 100 denti e di più un'appendice che ad ogni suo giro fa scappare un dente dell'altra ruota *m*: così la prima ruota ci dà il numero di giri dell'asse, l'altra numera le centinaia di giri; e perciò alle due ruote stanno annessi gl'indici *d* e *d'* (Fig. 182). Allo stesso asse *g* è fermato

Sirena di Cagnard Latour.

il disco ee', che colla sua faccia inferiore levigata tocca leggermente la faccia superiore della cassa A : questo disco girando coll'asse, compirà un'intera rivoluzione ogni volta che la ruota m' avanzerà di un dente. Sul fondo cc' vi sono parecchi fori v (Fig.183), ed altrettanti u che esattamente corrispondono ai primi, se ne trovano sul disco ee'; e vi stanno scolpiti in modo che quando combaciono per le loro luci, i rispettivi assi si trovano inclinati ad angolo ottuso.

L'apparecchio si mette in azione facendo che pel tubo B penetri nella cassa una corrente di aria o acqua, la quale uscendo dai fori v urta contro le pareti inclinate dei fori u, e pone in movimento il disco ee' con una celerità corrispondente a quella dell'aria o dell'acqua entrata nella cassa. Or immaginiamo che sul fondo cc' della cassa siavi un solo foro e 10 ne abbia il disco ee': questo ad ogni suo giro farà che la corrente fluida sia 10 volte interrotta e ristabilita ; quindi altrettante volte il fluido sarà compresso e dilatato, ed in conseguenza vi saranno dieci onde consecutive, le quali se mai si succedano con bastante celerità, saranno produttrici di suono. Ma se il fondo della cassa in vece di un foro ne avesse anche 10, allora ad ogni decimo di giro vi sarebbero 10 onde contemporanee, e quindi un suono altrettanto più forte.

Quando colla sirena si vuol determinare l'assoluta quantità di vibrazioni da cui risulta un dato suono, si comincia dal separare la vite i dalle ruote, spingendo il bottone b'. Indi s'introduce la corrente, e la si accelera abbastanza perchè la sirena vada all'unisono col suono che si vuol misurare. Allora in un medesimo istante si spingerà il bottone b, affinchè la vite ingrani colla ruota m' e si darà moto ad un pendolo a secondi. Quando l'apparecchio avrà agito così per un certo tempo, si arresteranno insieme il pendolo e la ruota m : si leggerà sul quadrante dell'orologio il tempo, ed il numero dei giri sugli indici d e d', e questo numero moltiplicato per quello dei fori che porta il disco ee' darà la quantità delle onde e quindi delle vibrazioni avvenute nella durata dell'esperimento. Si avranno così tutti i dati necessaril aila soluzione del proposto problema.

188. La relazione trovata dal calcolo tra il grado del suono ed il numero di vibrazioni fatte in un dato tempo del corpo sonoro, può confermarsi ancora per mezzo della *ruota dentata* di Savart. Per la gola della ruota A (Fig. 184) e per quella di una carrucola fermata all' asse *c* della ruota B, passa una fune senza fine. La circonferenza della ruota B è guernita di denti, che battono contro una laminetta flessibile, quando il moto dato ad A per mezzo della corda senza fine si trasmette a B. Or eseguendo l'esperimento si trova che accrescendo gradatamente la celerità di rotazione si passa dalla sensazione di una serie di rumori a quella di un suono, che poi diverrà sempre più acuto a misura che la rotazione sarà più celere e che in conseguenza maggior numero di vibrazioni avrà fatte la lamina. Il suono non è dunque che una serie di rumori, distinti per intervalli di tempo così piccoli che l'orecchio non può separarli; e ciò poi dimostra che l'impressione fatta sull'organo uditivo persiste, quantunque per un tempo assai piccolo, anche dopo che l'urto è compiuto; senza di che non sarebbe possibile la continuità in una sensazione prodotta da una serie di urti.

Ruota di Savart.

Conosciuto il diametro della ruota A e quello della carrucola fermata all' asse della ruota B, è facile calcolare quanti giri farà B per ogni giro di A; e se il numero dei giri di B si moltiplichi per quello dei denti di cui è armata la sua circonferenza, si avrà il numero degli urti ricevuti dalla lamina e quindi quello delle sue vibrazioni. Così la ruota di Savart potrà, egualmente che la sirena, offrire il mezzo di determinare il numero delle vibrazioni corrispondente ad un dato suono.

Uno dei risultamenti più rimarchevoli ottenuti da Savart per mezzo della sua ruota, è quello di una relazione esistente tra l' intensità del suono e la sua percettibilità. Quando egli coll'accrescere continuamente la celerità di rotazione giungeva a non più udire il suono perchè divenuto estremamente acuto, gli bastava sostituire una ruota dentata di maggior diametro, perchè con uno stesso numero di colpi dati alla lami-

na si ottenesse un suono percettibile. Or l'accresciuto diametro della ruota dentata faceva che ogni dente percuotesse con forza maggiore, e quindi producesse vibrazioni di maggior ampiezza. Non vi è dunque limite assoluto nella percezione dei suoni acuti, ma un limite relativo, dipendente dal grado di forza con cui l'onda sonora colpisce l'orecchio.

Anche pei suoni gravi il limite di percettibilità è relativo al suo grado di forza. La qual cosa Savart dimostrava per mezzo dell'apparecchio rappresentato dalla fig. 185. Si componeva di una spranga di ferro od anche di legno mobile intorno ad un asse orizzontale, e che nella sua rotazione passava tra due laminette di legno che se ne scostavano per 2 millimetri circa. Ad ogni passaggio che la spranga faceva tra le due lamine, udivasi come un' esplosione, che distinguevasi da quella che la seguiva, quando la rotazione andava con sufficiente lentezza; ma quando la rotazione diveniva più celere quelle esplosioni si trasformavano in un suono assai grave. Or a questa produzione di suono si perveniva con un numero di giri tanto più piccolo, quanto più grande era la distanza delle lamine dall'asse di rotazione, vale a dire quanto più grande era l'impeto con cui la spranga percuoteva l' aria interposta alle due lamine. Così Savart ha potuto rendere sensibile il suono corrispondente a 16 vibrazioni a secondo, mentre si ammetteva che non fosse percettibile il suono che ne fa meno di 32.

Misura della lunghezza dell'onda. 189. Essendo la celerità del suono indipendente dal suo grado ed in conseguenza dal numero di vibrazioni fatte dal corpo sonoro nell'unità di tempo, ne segue che conoscendo lo spazio percorso dal suono in un secondo ed il numero delle vibrazioni fatte in pari tempo, il quoziente dello spazio diviso per la quantità di vibrazioni darà la lunghezza dell' onda sonora. Così Savart essendo pervenuto colla sua ruota dentata a rendere percettibili i suoni che facevano 24000 vibrazioni a secondo, e coll'apparecchio indicato dalla fig. 185 quelli che ne facevano 16; ed alla temperatura media dell'atmosfera la celerità del suono essendo di 340 metri a secondo; ne segue che la lunghezza dell'onda pel suono di 24000 vibrazioni a

secondo è stata di $\frac{310^m}{24000}=0^m,0142$, e di $\frac{310^m}{16}=21^m,25$ per quello di 16 vibrazioni a secondo. Nell'acqua poi, che trasmette i suoni colla celerità di 1435^m a secondo, il primo dei suddetti suoni avrebbe generato delle onde lunghe $0^m,0597$, e quelle relative al secondo sarebbero state di 91^m, 675.

190. La ruota dentata di Savart ci ha fatto conoscere che il suono risulta da una serie celerissima di urti, la quale non altrimenti possiamo immaginare che agisca sull'orecchio se non colla continuata successione degl'impulsi prodotti dalle onde condensate. Or immaginiamo che due suoni continuati, come quelli prodotti da due canne di organo o da due diapason, presentino nella serie delle loro ondulazioni un periodo di coincidenze, tale che ogni m^{sima} onda del primo ed ogni n^{sima} onda del secondo vengano contemporaneamente a colpire l'orecchio; allora se le coincidenze sono abbastanza vicine, avremo la sensazione di un terzo suono, nascente dalla combinazione dei due primi. Poniamo a modo di esempio che si facciano cantare nel tempo stesso do_2 e sol_2; il primo di questi due suoni facendo, com'è noto, 2 vibrazioni mentre il secondo ne farà 3, al termine di questo tempo vi sarà una coincidenza nelle onde prodotte dai due suoni; e quello risultante dalla serie delle coincidenze farà 1 vibrazione mentre do_2 ne farà 2 e sol_2 ne farà 3. Ma il suono, che fa la metà del numero di vibrazioni di do_2 e la terza parte di quello corrispondente a sol_2, è do_1; questo dunque risulterà dalla combinazione dei due primi. E realmente l'orecchio avverte do_1 mentre cantano do_2 e sol_2.

Suoni di combinazione.

Quantunque di questi suoni di combinazione Tartini fosse stato il primo a farne menzione nel suo trattato di musica pubblicato nel 1754, e che perciò furono denominati *suoni di Tartini*, purtuttavia dovevano esser conosciuti da molto tempo, giacchè venivano adoperati per accordare le canne degli organi, essendo (per un'ingegnosa osservazione di Weber) i suoni di combinazione per l'orecchio ciò che un nonio è per l'occhio: col nonio si misurano le piccole frazioni lineari, con

un suono di combinazione si può valutare la differenza di tempo tra due vibrazioni, ciascuna delle quali non dura che qualche millesimo di secondo. Scheibler usando di questi suoni per ottenere un miglior accordo degli strumenti musicali, pervenne a scoprire la differenza di $\frac{1}{15000}$ tra le durate di due vibrazioni.

Cagione dell'accordo.

191. Il fatto che l'unione di un suono colla sua terza, quinta ed ottava, o meglio colla sua quinta ed ottava, formi una combinazione piacevole all' orecchio e che denominiamo *accordo*, non è che un effetto dei suoni di combinazione. Ed in vero se indichiamo con 1 il suono fondamentale, la sua terza, quinta ed ottava saranno rispettivamente rappresentate da $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$, 2; e se questi quattro suoni dell'accordo li rapportiamo alla doppia ottava bassa del suono fondamentale, essi saranno rappresentati dai numeri 4, 5, 6, 8, che tutti concorrono a produrre il suono di combinazione 1, ossia la doppia ottava bassa del suono fondamentale. E che la cagione dell'accordo stia propriamente nella tendenza dei suoni componenti a produrre un suono unico, lo si prova per mezzo dei due seguenti fatti — 1°. L'accordo del suono fondamentale colla sua quinta ed ottava piace meglio all'orecchio, che quello in cui entra anche la terza. Or l'accordo di prima, quinta ed ottava è rappresentato dai suoni 1, $\frac{3}{2}$, 2 che tendono a produrre la semplice ottava bassa di 1, mentre l'introduzione della terza allontana il punto di coincidenza, trasportandolo alla doppia ottava bassa — 2°. Facendo cantare insieme do_1, do_2, sol_2, do_3 e mi_3, suoni rappresentati da numeri 1, 2, 3, 4, 5, un orecchio poco esperto non avvertirà che do_1 perchè tutti i rimanenti combinandosi non producono che do_1; questo suono è dunque rinforzato da altri sei suoni eguali, quante per l'appunto sono le combinazioni di 2, 3, 4 e 5 a due a due, e perciò spicca tra gli altri e diviene unico per l'orecchio inesperto.

192. **Se le coincidenze delle onde produttrici di due suoni diversi non sieno distinte da intervalli di tempo abbastanza piccoli, in vece di risultarne un suono di combinazione, si a-**vrà una serie di battimenti che rassomigliano in certo modo al rullare di un tamburo. Poniamo per esempio che si facciano cantare insieme *la* e *la*♯, e che *la* faccia 120 vibrazioni a secondo; poichè i numeri di vibrazioni di *la* a *la*♯ sono, come qui appresso vedremo, nella ragione di 24 a 25, avremo che per 24 vibrazioni del primo e 25 del secondo vi sarà coincidenza. Ma *la* per ipotesi fa 120 vibrazioni a secondo; dunque per ogni secondo vi saranno cinque coincidenze, che l'orecchio percepirà sotto forma di cinque battimenti. **Battimenti**

193. Se i numeri dati a pàg. 285 come valori dei suoni della gamma musicale, si dividano il secondo pel primo, il terzo pel secondo, ecc., si avranno gl'*intervalli* dei suoni, denominati ancora *toni*. Si otterrà così: **Toni musicali.**

do , *re* , *mi* , *fa* , *sol* , *la* , *si* ; *do*

$$\frac{9}{8},\ \frac{10}{9},\ \frac{16}{15},\ \frac{9}{8},\ \frac{10}{9},\ \frac{9}{8},\ \frac{16}{15}.$$

Gl'intervalli rappresentati da $\frac{9}{8}$ si dicono *toni maggiori*, e *toni minori* quelli espressi da $\frac{10}{9}$, poichè i primi eccedono l'unità di $\frac{1}{8}$ ed i secondi di $\frac{1}{9}$, ed $\frac{1}{8}$ è maggiore di $\frac{1}{9}$; gl'intervalli poi $\frac{16}{15}$ si dicono *semitoni maggiori*, perchè eccedono l'unità di $\frac{1}{15}$ che presso a poco pareggia la metà di $\frac{1}{8}$.

Comparando un tono maggiore ad un minore si ha l'intervallo:

$$\frac{9}{8} : \frac{10}{9} = \frac{81}{80},$$

e la differenza $\frac{1}{80}$ per cui questo intervallo supera l'unità,

è ritenuta come trascurabile, e perciò i toni maggiori sono riguardati come eguali ai minori.

Comparando un tono minore ad un semitono maggiore, si ha l'intervallo:

$$\frac{10}{9} : \frac{16}{15} = \frac{25}{24};$$

e quello di un tono maggiore all'omonimo semitono sarà:

$$\frac{9}{8} : \frac{16}{15} = \frac{135}{128}.$$

Or se quest'ultimo intervallo lo poniamo eguale a $\frac{25}{24}x$, troveremo il fattore x eguale a $\frac{81}{80}$; quindi sarà:

$$\frac{135}{128} = \frac{25}{24} \cdot \frac{81}{80} = \frac{25}{24}$$

ritenendo come eguale all'unità il fattore $\frac{81}{80}$. Laonde diremo che un tono qualunque, sia maggiore o minore, sarà accresciuto di un semitono, quando il numero delle sue vibrazioni sarà aumentato nel rapporto di 24 a 25, e diminuito viceversa anche di un semitono allorchè le sue vibrazioni saranno scemate nella ragione di 25 a 24. Nella scrittura musicale l'aumento di un semitono s'indica coll'apposizlone del segno ♯ (*diesis*) e la diminuzione col segno ♭ (*bemolle*).

Considerati così come eguali tutti i toni della gamma musicale, la loro serie potrà esser indicata nel seguente modo:

do , *re* , *mi* , *fa* , *sol* , *la* , *si* , *do*.

$1 \; , \; 1 \; , \; \frac{1}{2} \; , \; 1 \; , \; 1 \; , \; 1 \; , \; \frac{1}{2}.$

E se prendendo a norma questa serie, denominata *gamma naturale*, volessimo comporre quella che cominciasse a modo di esempio da *re*, allora per avere la stessa successione di toni e

semitoni, bisognerebbe accrescere di un semitono *fa* e di un altro *do*, e si avrebbe la scala di *re*:

re , *mi* , *fa*♯, *sol* , *la* , *si* , *do*♯, *re*

$1 \;,\; 1 \;,\; \frac{1}{2} \;,\; 1 \;,\; 1 \;,\; 1 \;,\; \frac{1}{2}\,.$

194. Supponiamo che un istrumento a suoni fissi, come un'arpa, un gravicembalo, ecc., sia accordato in modo di aver tutte le terze esatte, vale a dire ch'essendo la 1ª terza $mi_1 = \frac{5}{4} do_1$, sia ancora la 2ª terza $sol_1\sharp = \frac{5}{4} mi_1$, e quindi la 3ª $do_2 = \frac{5}{4} sol\sharp$. Avremo in conseguenza $do_2 = \frac{5}{4} \cdot \frac{5}{4} \cdot \frac{5}{4} do_1$. Ma sappiamo (n° 186) esser $do_2 = 2do_1$; dunque se le terze sono esatte, saranno false le ottave. Temperamento.

Supponiamo ancora che sieno esatte tutte le quinte, di cui la 1ª è $sol_1 = \frac{3}{2} do_1$, e la 12ª, la quale corrisponde a do_8, ci darà $do_8 = \left(\frac{3}{2}\right)^{12} do_1 = 129{,}75 do_1$; ma sappiamo d'altronde dover essere $do_8 = 2^7 = 128$; dunque ponendo esatte le quinte, saranno necessariamente false le ottave.

E poichè l'orecchio non soffre verun'alterazione nelle ottave, così è bisognato modificare alquanto le 3ᵉ e le 5ᵉ. I metodi all'uopo escogitati portano il nome di *temperamenti*; e si è adottato quello che consiste in dividere la gamma naturale in 12 semitoni eguali, il cui valore costante si ottiene dall'equazione $do_2 = do_1 \,.\, x^{12}$. Ma $do_1 = 1$ e $do_2 = 2$; è dunque $x = \sqrt[12]{2} = 1{,}05946$, ed in conseguenza sarà la 1ª terza $mi_1 = x^4 = 1{,}25992$, e la 1ª quinta $sol_1 = x^7 = 1{,}4983$. Ma per valore naturale è $mi_1 = 1{,}25$, e $sol_1 = 1{,}5$; dunque pel temperamento adottato, la terza è divenuta alquanto più grande, la quinta alquanto più piccola.

Il temperamento non riguarda che gli strumenti a suoni fissi; quelli che, come il violino e la voce umana, possono andare dal grave all'acuto per gradazione insensibile, non sono

obbligati a temperare le terze e le quinte, se non allora che cantano in concerto di strumenti a suoni fissi.

CAPO TERZO.

LEGGI DELLE VIBRAZIONI.

Vibrazioni delle corde.

195. Le corde possono vibrare normalmente alla loro lunghezza o nel senso di essa: nel primo caso si hanno *vibrazioni trasversali*, e *longitudinali* nel secondo. Le prime si ottengono battendo le corde o passandovi per traverso un arco di violino, le seconde si producono strofinandole nel senso della loro lunghezza.

Quando una corda, vibrando trasversalmente, produce un suono grave e sostenuto, un orecchio esercitato sentirà oltre il suono fondamentale l'ottava della sua quinta, la doppia ottava della sua terza, e sovente l'ottava e la doppia ottava dello stesso suono fondamentale. Se questo suono sia rappresentato con 1, l'ottava della sua quinta sarà 3, la doppia ottava della sua terza sarà 5, 2 l'ottava del suono fondamentale e 4 la sua doppia ottava. La corda eseguirà dunque in un medesimo tempo delle quantità di vibrazioni, proporzionali ai numeri 1, 2, 3, 4 e 5; quindi per la relazione esistente (n° 186) tra la lunghezza di una corda ed il numero di vibrazioni ch'essa produce, i suoni corrispondenti ai numeri 1,2,3,4 e 5 dimostrano che insieme all'intera lunghezza della corda ne vibrano ancora la metà, il terzo, il quarto ed il quinto; come rispetto alla metà ed al quarto della lunghezza totale si vede rappresentato nella fig. 187.

La coesistenza di queste diverse vibrazioni è messa in piena luce da un esperimento di Sauveaur. Trasportato il ponticello mobile di un sonometro nel mezzo della corda, questa si prema dolcemente con un dito, di modo che tocchi appena il ponticello; allora si faccia vibrare una delle due parti della

corda, si vedrà vibrare anche l'altra, ed il suono prodotto sarà l'ottava superiore di quello che risulterebbe dall'intera lunghezza della corda. La pressione fatta nel suo mezzo ha impedito la vibrazione di tutta la lunghezza, ma non quella delle due metà, e perciò il suono è salito all'ottava superiore. Ripetendo l'esperimento col fermare il ponticello al terzo, al quarto ed al quinto dell'intera lunghezza, la corda produrrà i suoni rappresentati dai numeri 3,4 e 5; e per dimostrare che anche per queste divisioni gli estremi delle parti aliquote sono immobili, mentre vibrano i punti intermedii, Sauveaur usava di un mezzo semplice ed ingegnoso. Egli piegava dei pezzetti di carta tolti da due fogli di diverso colore; poneva quelli di un colore negli estremi delle parti aliquote della corda, gli altri nei punti medii: facendo allora vibrar la corda, i secondi pezzetti di carta cadevan tutti, i primi restavano immobili.

Questa disposizione delle corde a produrre suoni armonici del suono fondamentale rende ragione del seguente fatto. Ponendo l'una vicino all'altra e parallelamente due corde omogenee, di egual diametro ed egualmente tese, e che l'una abbia una lunghezza aliquota di quella dell'altra; si troverà che facendo vibrare la più corta, il suono si comunicherà all'altra per mezzo dell'aria, e le due corde vibreranno all'unisono.

E ciò delle vibrazioni trasversali. Rispetto poi alle longitudinali supponendo che lo strofinio, che deve eccitare la vibrazione della corda, cominci dall'estremo A (Fig. 188) e vada verso B, nello stesso senso le molecole verranno addensate in una parte e rarefatte nell'altra; e quando sarà cessata l'azione perturbatrice, le forze continue che reggono l'equilibrio molecolare, faranno tornare le molecole alle prime posizioni con celerità crescente, che avrà il suo massimo valore nel punto corrispondente al luogo di equilibrio. Questo punto sarà perciò trascorso, finchè non sarà distrutta la velocità acquistata; e le molecole, al pari di un pendolo allontanato dalla verticale del suo punto di sospensione, faranno prima di tornare al riposo molte oscillazioni intorno ai loro luoghi di e-

quilibrio, e le quali comunicate all'aria ambiente diverranno produttrici di suono.

Da quest' analisi degli effetti, che lo strofinio nel senso della lunghezza deve produrre sull' equilibrio molecolare di una corda, risulta che immaginandola divisa in falde normali alla sua lunghezza, il moto di traslazione il quale è nullo per le falde estreme, dovrà esser massimo per la falda media ; e che viceversa il moto di addensamento e successiva rarefazione dovrà esser massimo nelle falde estreme e nullo nelle medie. Si avrà dunque nel mezzo della corda un *ventre* di vibrazione, e due *nodi* nei suoi estremi.

Le quantità di vibrazioni longitudinali e trasversali che una corda può eseguire in un dato tempo sono tra loro unite dalla relazione:

$$n' = n\sqrt{\frac{l}{\alpha}},$$

nella quale n' disegna il numero delle vibrazioni longitudinali, n quello delle trasversali, l esprime la lunghezza della corda ed α la quantità di cui essa si allunga per l'azione della forza che la tende. E poichè α è sempre piccolissima rispetto ad l, così n' dovrà essere assai grande in comparazione di n; la qual cosa ben si accorda col fatto, essendo noto che i suoni prodotti da vibrazioni longitudinali son sempre acutissimi.

Vibrazione delle verghe.

196. Le verghe cilindriche e prismatiche possono egualmente che le corde concepire vibrazioni trasversali o longitudinali e produrre diversi suoni. Le vibrazioni trasversali si ottengono passandovi sopra con un arco di violino, le longitudinali strofinandole con un pannolino bagnato, se son di vetro, o con pannolino impolverato di resina, quando siano di metallo o di legno. Sì nell'uno che nell'altro modo di vibrazione esse possono dividersi in più parti vibranti all'unisono; ma i suoni prodotti dalle vibrazioni longitudinali essendo molto acuti, i loro armonici non si otterranno senza una sufficiente lunghezza della verga ; così da un cilindro di vetro lungo 2 metri difficilmente si avrà l'armonico 4. Nulla dicia-

mo del diametro della verga, perchè conformemente alla teoria l'esperienza ha dimostrato che il grado del suono prodotto da vibrazioni longitudinali n'è del tutto indipendente.

Nell'atto delle vibrazioni di un solido vi ha delle molecole che eseguono ampie oscillazioni, mentre le altre sono presso che in riposo. I luoghi da queste occupate costituiscono le *linee nodali* del solido, e che si possono rendere visibili spargendo sulla faccia del solido un poco di sabbia fina e secca. Questo metodo è dovuto a Galilei.

Il corso delle linee nodali in un cilindro di vetro eccitato a vibrazioni longitudinali può definirsi nel seguente modo. Per avere il disegno di queste linee sulla faccia esterna del cilindro, lo si terrà orizzontalmente, e poggiando sopra una delle sue metà un anello di carta (Fig. 189) di un diametro più grande, si ecciterà l'altra metà a vibrare ; allora si vedrà l'anello correre longitudinalmente sul cilindro fino ad un certo punto ed ivi fermarsi: sarà quello un punto della linea nodale. Girando a poco a poco il cilindro intorno al suo asse, e segnando ad ogni volta il punto di riposo dell'anello, si avrà nella serie dei punti un'elica a larghe spire, che rappresenterà l'andamento della linea nodale sopra una metà del cilindro. Cercandola similmente sull'altra metà, si troverà una seconda elica non congiunta alla prima e sovente a spire che procedono in senso opposto. E quando il cilindro in vece del suono più grave che può produrre, dia qualcuno degli armonici, allora si vedrà l'elica invertire il suo andamento ad ogni nodo di vibrazione. Se il cilindro non è che un tubo, si potranno analogamente esplorare le linee nodali sulla faccia interna, poggiandovi un grosso granello di sabbia o un globetto di avorio.

Savart, a cui si debbono tutti questi risultamenti, ha trovato che nelle verghe prismatiche le linee nodali di una faccia corrispondono ai ventri dell'altra; e da questa singolare disposizione egli ha dedotto che la verga nell'atto della sua vibrazione longitudinale soffre un moto di contorcimento.

Qualunque però sia il movimento di vibrazione, longitudina-

le o trasversale, è d'uopo che proceda in opposte direzioni nei due lati delle linee nodali, che senza di ciò non potrebbero esistere. Così nelle vibrazioni trasversali della corda *ad* (Fig. 187) se in *b* evvi un nodo, dovrà esservi ancora un punto d'inflessione delle due opposte curvature *bca*, *bed*. Similmente se la verga *mn* (Fig. 190) presenta dei nodi in *a*, *b*, *c*, è d'uopo che mentre dei movimenti di condensazione convengono in *a* e *b*, due opposti movimenti di rarefazione partano dal nodo *c*. Senza questa simultaneità di opposti movimenti le sezioni *a*, *b*, *c* non potrebbero esser nodali, perchè concepirebbero moto di traslazione.

Il *diapason* (Fig. 191) che fissa il *la* degli strumenti musicali, ci offre un esempio di verghe curve vibranti. Si compone di due bracci curvilinei ed elastici che in basso si attaccano ad un piede che deve sostenerlo sulla cassa destinata a rinforzarne il suono; e perchè questo riesca costante, si usa mettere in vibrazione le due verghe introducendovi il cilindro *k* e tirandolo fuori per lo spazio che separa le loro estremità.

Vibrazione delle lamine.

197. Le lamine fatte di diverse sostanze, metallo, legno, vetro, terra cotta, ecc. e di qualunque figura, triangolari, quadrate, circolari, ellittiche, ecc., possono concepire movimento di vibrazione, quando siano strofinate negli orli con arco di violino, dopo esser state fermate in uno o più punti. Da ciascuna potranno aversi più suoni, per ognuno dei quali si troverà una diversa disposizione di linee nodali, rese sensibili dal movimento dei granelli di sabbia sparsi sulla lamina prima di eccitarla a vibrazione. I granelli si vedranno saltellare e riunirsi finalmente secondo certe linee, che rappresentano le parti della lamina che sono in riposo mentre le altre vibrano; ed il numero di queste linee riuscirà più o meno grande, secondo che più o meno acuto sarà il suono prodotto. Il quale dipende dalla figura e dimensione della lamina, dalla sua natura, dalla posizione e dal numero dei suoi punti fissi, ed in fine dalla direzione e celerità di moto dell'arco che l'eccita a vibrare.

Le lamine quadrate se hanno uniforme elasticità ed i pun-

ti fissi siano convenientemente disposti, produrranno sistemi più o meno simmetrici di linee nodali, risolubili in linee diagonali o in linee che dividono in parti eguali i lati opposti della figura, come si vede nella fig. 186.

Le lamine circolari (Fig. 186 *bis*) possono produrre linee nodali dirette secondo diametri, e che dividono la superficie del cerchio in settori eguali tanto più numerosi, per quanto il suono è più acuto. Questi settori riescono sempre di numero pari, ciò che riferma l'idea di un opposto movimento nei due lati di una linea nodale. Fissando la lamina per due punti presi sopra un diametro, e per un foro scolpito nel suo centro strofinandola con una cordicina di crini impolverata di pece, si avranno linee nodali circolari che andranno crescendo di numero col grado del suono. Queste non di rado si troveranno insieme a linee nodali diametrali, e talvolta a linee iperboliche.

Le linee nodali delle lamine circolari sono talvolta animate da moto di oscillazione, tal altra da moto di continua rotazione. Savart, cui è dovuta la conoscenza di questo fatto, l'ebbe nel seguente modo. Un disco di ottone, perfettamente lavorato, stava orizzontalmente fissato pel suo centro; e sulla sua faccia superiore stava sparsa della polvere di licopodio, preferibile alla sabbia per la sua leggerezza. Con un' arcata continua traendo dal disco un suono grave e pieno, le linee diametrali che si disegnavano sulla superficie cominciarono ad oscillare, ed allargando sempre più le loro escursioni finirono col prendere un moto di rotazione, per mezzo del quale la polvere di licopodio trasportata quasi da un vertice descriveva una circonferenza parallela a quella del disco.

Alla classe delle lamine vibranti appartengono le campane ed altri consimili strumenti sonori, che al pari delle prime si dividono in più parti vibranti all'unisono. Facendo suonare uno di questi strumenti, già pieno di acqua, si vedranno le linee nodali disegnarsi sulla superficie del liquido, e si potranno seguir coll' occhio le loro oscillazioni da un lato e dall'altro di una certa posizione di equilibrio. E queste oscil-

lazioni sono senza dubbio la causa di quell' intermittenza che si osserva talvolta nei tocchi di una campana, diretti verso l'osservatore attraverso un' aria calma; imperocchè l'energia del suono dovrà riuscire più grande quando la linea nodale muovesi verso l'osservatore, che quando procede in senso opposto.

Perchè le membrane vibrassero al pari delle lamine, è d'uopo che sieno tese. Savart usava incollarle sopra un telaio di legno o sulla circonferenza di una campana di vetro, e ne faceva variare la tensione rendendole più o meno umide. Se ad una membrana così preparata e coperta di granelli di sabbia, si avvicini un campanello, ovvero una canna di organo, si vedrà sotto il tintinnio del campanello o pel suono sostenuto della canna i granelli di sabbia saltellare e riunirsi nelle linee nodali.

Vibrazione dei fluidi. 198. I fluidi, siano liquidi siano aeriformi, possono concepire movimento di vibrazione al par dei solidi. Ponendo in un recipiente abbastanza profondo la sirena di Cagnard Latour, e facendo entrare nella cassa dell' istrumento una corrente di acqua che venga da un serbatoio situato a conveniente altezza, si vedrà la sirena produrre un suono continuo che diverrà sempre più dolce, a misura che andrà elevandosi l'acqua nel recipiente. Le compressioni ed espansioni patite dal liquido nel passare pei fori della sirena, vi hanno dunque prodotto un moto di vibrazione.

Negli strumenti da fiato è l'aria contenuta quella che costituisce il corpo sonoro. In una canna musicale (Fig. 168) che abbia una delle facce laterali chiusa da una lastra di cristallo si tenga sospeso un telarino M, su cui sia teso un pezzo di membrana, e su questa sia sparsa della sabbia: facendo suonare la canna, si vedranno saltellare i granelli di sabbia sulla membrana; e facendo che questa scenda lentamente nella canna si troverà qualche posizione nella quale durante il suono la sabbia rimane in quiete. La colonna di aria è dunque vibrante mentre la canna suona, e presenta delle superficie nodali al pari di un solido sonoro. Quindi si comprende come il grado

del suono riesca indipendente dalla natura del tubo sonoro, quando le pareti abbiano sufficiente doppiezza; poichè se queste fossero sottili potrebbero venire eccitate dalla vibrazione della colonna di aria che racchiudono, e quindi elevare ed abbassare il grado del suono secondochè tenderanno ad accrescere o diminuire la celerità di vibrazione della colonna fluida.

In varii modi si può eccitare a vibrazioni la colonna di aria che un tubo racchiude — 1° Dirigendo una corrente di aria sull' orlo tagliente di una parte del tubo: in questo modo si fa suonare un flauto, si produce un fischio sul foro di una chiave, ecc., — 2.° Facendo che l' aria entri nel tubo sonoro per un breve condotto che ha libera e sottile una delle sue pareti: questa, che dicesi *linguetta*, vibra per l'urto della corrente e comunica il suo moto all' aria contenuta nel tubo. In questo modo si fa suonare il clarino, la cennamella, ecc; nella tromba, nel corno da caccia, ecc., sono linguette le labbra del suonatore — 3° Producendo con rapidi cangiamenti nel diametro di un tubo alterne compressioni ed espansioni nella colonna di aria che lo percorre; così il cacciatore imita il canto di alcuni uccelli coi suoni che trae dal *richiamo*. È questo un piccolo cilindro (Fig. 192) che ha un foro nel centro di ciascuna base: il cacciatore lo pone tra le labbra e le arcate dei denti, ed aspirando l' aria con forza più o meno grande, ne ottiene suoni più o meno acuti. Una consimile serie di addensamenti e rarefazioni può essere ancora prodotta da cangiamenti fisici che rapidamente si succedono in un punto di un definito volume fluido. Così se si adatta un tubo acuminato ad un recipiente da cui per effetto di reazione chimica si abbia svolgimento di gas idrogeno, ed acceso il getto di questo gas si circondi la fiamma con un tubo abbastanza lungo e largo, si udirà un suono continuo ed intenso, che si genera nel seguente modo. Il vapore acqueo prodotto dalla combustione dell' idrogeno, sollevandosi nel tubo viene a condensarsi ad una certa distanza dalla fiamma; ivi si produce un voto che l' aria esterna viene immediatamente a riempire, e poichè

il voto e l' accorrere dell' aria debbono celeramente ripetersi per la continua produzione del vapore acqueo, così la colonna di aria contenuta nel tubo ne riceve ripetute scosse che le imprimono un moto di vibrazione.

Tubi sonori. 199. Premesse le cose dette nel n° precedente, passiamo a dichiarare i fenomeni dei tubi sonori. Rappresenti A B (Fig. 193) un tubo chiuso in B ed aperto in A, e poniamo che nella falda di aria *cd*, situata nell'orifizio del tubo, avvengano rapide e continuate oscillazioni. Movendo *cd* da A verso B, l'aria contenuta nel tubo ne verrà compressa, e sarà viceversa dilatata nell' opposta oscillazione di *cd*; e perchè queste due fasi possano continuamente ripetersi, è d'uopo che nella falda giacente sul fondo vi sia sempre un nodo di vibrazione, ed un ventre in quella che occupa l'orifizio. Or queste due condizioni possono rimaner soddisfatte con diverse lunghezze dell'onda sonora.

Poniamo in primo luogo che la falda *cd* abbia tale celerità di oscillazione da far pervenire il moto di condensazione sul fondo B, quando essa avrà compiuta la metà della sua escursione da A verso B. Durante l'altra metà la condensazione sarà necessariamente crescente da B verso A, e qui giungerà al termine dell'escursione di *cd* da A verso B. Allora comincerà la 2ª oscillazione di *cd*, che procedendo in senso opposto darà origine ad un' onda rarefatta; e questa analogamente all'onda condensata giungerà in B quando *cd* avrà fatta la metà della seconda oscillazione, e tornerà in A al compiersi di essa. Le stesse fasi si ripeteranno durante le oscillazioni 3ª e 4ª, 5ª e 6ª, ecc., della falda *cd*; e la massa di aria contenuta in A B diverrà successivamente un'onda condensata ed un'onda rarefatta. E questo modo di vibrazione dell'aria contenuta in A B corrisponde all'onda più lunga che essa potrà costituire e quindi al suono più grave che potrà rendere.

Poniamo in secondo luogo che dopo la 1ª semioscillazione della falda *cd* da A verso B, il moto di compressione sia pervenuto in *zv*, ossia alla terza parte della lunghezza del tubo; e quindi giungerà in *st*, ossia ai due terzi della stessa lunghezza, quando

la 1ª oscillazione sarà compiuta. Colla 2ª oscillazione della stessa falda *cd* avrà cominciamento il moto di rarefazione in A, e questo toccherà *zv* nel medesimo istante in cui la precedente condensazione sarà giunta in B. Da questo luogo respinta, la condensazione moverà in opposto senso e perverrà in *st* nel medesimo istante in cui dall'altro lato vi giungerà la rarefazione: così la falda *st*, aspirata a sinistra dalla rarefazione e spinta nello stesso senso dalla condensazione riverberata dal fondo, concepirà moto di traslazione, e sarà sede di un ventre. Ma quando la rarefazione sarà pervenuta in *st*, sarà compiuta la 2ª oscillazione della falda *cd*, e comincerà la 3ª che recherà un'altra onda condensata la quale toccherà lo strato *zv* nel tempo stesso che per opposta direzione vi giungerà la 1ª onda condensata riflessa dal fondo B: sotto queste eguali ed opposte compressioni la falda *zv* resterà in riposo e sarà in conseguenza un nodo di vibrazione. A contare da questo istante il movimento non farà che riprodursi sempre colle stesse fasi, e si avranno contemporaneamente due nodi di vibrazione in *zv* ed *lk*, e due ventri in *cd* ed *st*.

Similmente si dimostrerà che la condizione fondamentale di un nodo nel fondo del tubo e di un ventre nell'orifizio sarà soddisfatta, ponendo che il moto di compressione arrivi al fondo del tubo dopo $2+\frac{1}{2}$ vibrazioni, dopo $3+\frac{1}{2}$, ed in generale dopo $n+\frac{1}{2}$ vibrazioni. Or chiamando l la lunghezza del tubo, quelle delle onde sonore che vi si potranno generare, saranno rappresentate dalla serie:

$$4l,\ \frac{4l}{3},\ \frac{4l}{5},\ \frac{4l}{7},\ \ldots\ \frac{4l}{n+1},$$

ed i suoni corrispondenti, come inversamente proporzionali alle lunghezze delle onde, lo saranno dall'altra:

$$\frac{1}{4l},\ \frac{3}{4l},\ \frac{5}{4l},\ \frac{7}{4l},\ \ldots\ \frac{n+1}{4l};$$

quindi rappresentando con 1 il suono più basso, l'intera serie dei suoni possibili sarà:

1, 3, 5, 7, ... n+1.

Supponiamo ora un tubo AB (Fig. 194) aperto nei due estremi, e che la falda di aria giacente nell'orifizio A sia scossa in modo da compiere un'intera oscillazione, mentre il moto di compressione da questa prodotto giunge nell'estremo B. La falda *de* che ivi si trova diffonderà il suo moto di compressione nell'aria ambiente, e la reazione che ne sarà l'effetto, produrrà in B una rarefazione nel tempo stesso che un'altra ne comincia in A per la 2ª oscillazione della falda vibrante. Queste due rarefazioni perverranno nel tempo stesso alla falda centrale *mn* che resterà immobile sotto due aspirazioni eguali ed opposte, e così diverrà sede di un nodo. Ma alla rarefazione cominciata in B mentre un'altra principiava in A per la 2ª oscillazione della lamina vibrante, terrà dietro per lo stesso principio di reazione un moto di compressione che ivi avrà origine nell'istante in cui un egual movimento comincia in A per la 3ª oscillazione della falda che vi giace; e queste due condensazioni egualmente che le precedenti rarefazioni perverranno nel medesimo tempo alla stessa falda *mn*, e la terranno in equilibrio. Sarà dunque *mn* un nodo di vibrazione; *ac* e *de* due ventri; ed il suono risultante, come quello ch'è prodotto da un'onda lunga due volte il tubo, è il più grave che se ne possa ottenere.

Poniamo in secondo luogo che il moto di compressione pervenga alla falda media *cd* (Fig. 195) dopo la 1ª oscillazione di *ab*. Terminata la 2ª oscillazione la metà *ad* della colonna di aria sarà occupata da un'onda dilatata, l'altra metà *cf* lo sarà da un'onda condensata; ed il moto di compressione, come sarà pervenuto in *cf*, si disperderà nell'aria ambiente, che reagendo farà cominciare una rarefazione in *ef* nel medesimo istante in cui l'analogo movimento prodotto dalla 2ª oscillazione della falda *ab*, perviene alla falda *cd*. Questi due movimenti che procedono l'uno all'incontro dell'altro, e che per-

verranno l'uno in *st* e l'altro in *zv* dopo $\frac{1}{4}$ della 3ª oscillazione di *ab*, andranno poi a confondersi in *m'n'* dopo la metà della stessa oscillazione: così la falda *m'n'* che dista da *ef* di $\frac{1}{4}$ della lunghezza del tubo, diverrà un nodo di vibrazione. Un secondo nodo verrà nello stesso tempo a costituirsi in *mn* similmente situata rispetto ad *ab*, imperocchè quando la rarefazione sarà pervenuta in *m'n'*, vale a dire al termine della 3ª oscillazione di *ab*, la reazione molecolare farà cominciare nella falda *mn* un addensamento diretto da destra a sinistra e nel medesimo istante in cui un simile movimento che viceversa procede da sinistra a destra, viene dalla falda *ab*, e che si confonderà col primo in *mn* come avrà termine la metà della 3ª oscillazione. In tal modo la lunghezza della colonna di aria sarà divisa nelle parti $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ vibranti all' unisono, e l'onda intera avrà per lunghezza la metà del tubo. Nello stesso modo potranno aver luogo 3, 4, ecc., nodi di vibrazione, e prodursi delle onde le cui lunghezze formeranno la serie:

$$1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \text{ecc.},$$

e produrranno la serie de'suoni;

$$1, 2, 3, 4, 5, \ldots;$$

ossia un suono fondamentale, la sua ottava, l'ottava della sua quinta, la sua doppia ottava, la doppia ottava della sua terza, ecc.

Dalle cose suddette si rileva qual differenza di condizioni dinamiche abbia luogo in una colonna di aria, secondochè essa conduce un suono generato da un altro corpo, ovvero concepisce in sè stessa un movimento di vibrazione. Nel primo caso l'azione molecolare alternandosi con due opposte fasi di densità per ogni falda del fluido conduttore, comunica a ciascuna di esse indistintamente un moto di traslazione oscilla-

toria. Viceversa avviene nel secondo caso, in cui si stabiliscono nella colonna vibrante uno o più nodi pei quali sono massime le fasi di densità e nulli i movimenti di traslazione, mentre nelle falde divenute ventri i moti di traslazione sono massimi e nulle le fasi di densità. Or per la produzione dei nodi e quindi dei ventri è indispensabile che mentre un movimento di compressione o rarefazione procede in un senso, un altro simile ne venga in senso opposto; senza di che la colonna di aria non potrebbe divenir vibrante. E con ciò viene ad esser dichiarata la vera funzione dei tubi sonori; i quali non hanno altro ufficio che quello d'invertire l'oscillazione molecolare, sia facendola riverberare sul fondo quando son chiusi da un lato, sia occasionando una reazione in uno dei loro orifizii quando vi giunge il moto eccitato nell'altro.

Questa teoria dei tubi sonori fu data da Daniele Bernoulli nel 1764. Egli ne verificò i risultamenti con tubi di varie lunghezze, che or lasciava aperti nei due estremi, ed or ne chiudeva soltanto uno; e perchè le oscillazioni della falda di aria situata all' orifizio del tubo non fossero state turbate dal modo stesso di eccitarla a movimento, egli soleva produrre il suono soffiando ad una certa distanza dall'imboccatura. Nuove sperienze furono fatte più tardi da Biot con Hamel, ed i risultamenti furono conformi alla teoria del Bernoulli, e tanto meglio per quanto i tubi erano più lunghi, poichè nella stessa ragione scemava l' influenza di quelle quantità che la teoria negligeva, vale a dire l'agitazione nelle prime falde di aria ed il leggiero cangiamento della loro densità, che Bernoulli suppose inesistente, ma che intanto è indispensabile per trasmettere il suono all'aria ambiente. Del resto queste modificazioni che l'esperienza indicava, sono state trovate dal Poisson conformi ad una teoria più generale da lui escogitata sulle vibrazioni dei fluidi aeriformi.

Vibrazioni comunicate.

200. Un diapason darà suono più forte quando sia poggiato sopra una cassa sonora; e perciò gli strumenti a corde son tutti provveduti di casse, che non hanno altro ufficio che quello di riforzare i suoni. Il moto di vibrazione può dunque

esser trasmesso da un corpo all'altro, sia per contatto immediato, sia per un mezzo ponderabile qualunque.

La direzione secondo la quale si trasmette il movimento, non ha lieve influenza sulla quantità della vibrazione trasmessa. Fermando l'estremo di una verga orizzontale ad una cassa sonora, a quella di un gravicembalo per esempio, e sull'altro estremo poggiando verticalmente un diapason vibrante, si osserverà che la quantità di vibrazione comunicata, minima quando il piano del diapason è normale alla lunghezza della verga, andrà poi crescendo col girare di questo piano; e diverrà massima quando lo stesso piano combacerà colla lunghezza della verga. Analogo fenomeno si otterrà da un'arpa, avvicinando alle sue corde delle altre capaci di rendere suoni armonici con quelli delle prime; allora si vedrà la comunicazione di moto effettuirsi o pur no, secondochè i due sistemi di corde saranno paralleli o incrociati ad angolo retto.

La direzione del moto vibratorio non viene alterata nel comunicarsi da un corpo all'altro. Per un foro scolpito nel mezzo di una lamina elastica facendo passare una corda di tal diametro da entrarvi a stento, e tesa verticalmente la corda affinchè la lamina resti orizzontale, si sparga su di essa della polvere; si vedrà questa correre tangenzialmente sulla lamina e saltellare su di essa, secondochè la corda sarà spinta a vibrazioni trasversali o longitudinali. Quindi è che nel violino le vibrazioni trasversali delle corde comunicano vibrazioni tangenziali al ponticello ed allo *spirito* e vibrazioni normali ai due fondi della cassa. Purtuttavia la forma del corpo a cui la vibrazione si trasfonde può modificare questa legge di comunicazione; e così avviene che percuotendo un anello elastico secondo uno dei suoi raggi, tutte le parti dell'anello vibreranno similmente, e questo moto non potrà riuscire parallelo al moto impresso se non per uno dei suoi diametri.

È impossibile che avvenga trasmissione di moto vibratorio senza sincronismo di vibrazioni tra il corpo che dà e quello che riceve l'azione. È noto d'altronde che le vibrazioni longi-

tudinali delle verghe sono più celeri delle trasversali; in conseguenza se le prime trasmettendosi eccitano le seconde, è d'uopo che queste divengano più celeri, e quelle più lente. E Savart ha osservato che in casi simili le linee nodali riescono più allargate nelle vibrazioni longitudinali e più ravvicinate nelle trasversali, di quel che sarebbero se le verghe non fossero tra loro congiunte.

Da questa reciproca influenza tra le vibrazioni direttamente eccitate e le trasfuse risulta — 1°. Che il grado del suono prodotto dal sistema deve tanto più divergere da quello del corpo agente, per quanto più differiscono tra loro i suoni che nelle medesime circostanze i due corpi renderebbero isolatamente — 2° Che la comunicazione del moto sarà tanto più facile, ed in conseguenza più forte il suono risultante, per quanto i suoni proprii a ciascuno dei corpi componenti il sistema, meno differiranno tra loro. Quindi è che la facilità della comunicazione risulta massima nel caso dell'unisono, come dimostra un ingegnoso apparecchio di Savart. Si compone di due tubi di gran diametro (Fig. 196) entranti l'uno nell'altro a modo di cannocchiale, e di una campana *a*; e questi due pezzi dell'istrumento sono sostenuti da colonnette mobili in una scanalatura fatta sopra la base dell' istrumento. Tenendo la campana in continua vibrazione per mezzo di un arco di violino, si faccia variare lentamente la posizione e lunghezza del sistema dei due tubi, fino a cogliere esattamente l'unisono; ed allora il suono della campana diverrà così forte da non potersi tollerare. Allo stesso principio deve ancora riferirsi un fatto raccontato da Eulero: un uomo spezzava un bicchiere col semplice impulso della sua voce; egli determinava il grado di suono del bicchiere percuotendolo leggermente, indi ne avvicinava l'orifizio alla bocca e modellava la sua voce fino ad incontrar l'unisono; ciò ottenuto, egli dava un forte colpo di voce sullo stesso tono ed il bicchiere andava in pezzi.

Da tutto ciò si rileva che i corpi non per ogni dimensione e forma sono egualmente atti a ricevere e trasmettere un dato moto di vibrazione. Con diligenti ricerche Savart si fece a de-

terminare le forme e dimensioni di tutte le parti del violino a fine di ottenere che le vibrazioni delle corde vi si trasfondessero completamente: ed il violino così costruito diede suoni più dolci di quelli che ordinariamente se ne ottengono. E nel ricercare le forme e dimensioni che i corpi debbono avere per meglio rispondere alle vibrazioni comunicate, egli trovò che pei tubi la comunicazione vibratoria per una lunga serie di suoni riesce più agevole, come sono più larghi e meno alti; e quindi potè dichiarare la funzione delle casse che si trovano in tutti gli strumenti a corda, essendochè colle loro forme larghe e depresse rassomigliando a tubi larghi e poco alti, rispondono agevolmente a tutti i suoni degli strumenti.

Le oscillazioni molecolari di un corpo che vibra in un mezzo resistente qualunque, come aria, acqua, mercurio, ecc., scemano di celerità, perchè trasfondono parte della loro forza nelle molecole del mezzo: e questa perdita dipenderà non solamente dalla densità del mezzo, ma eziandio dall' angolo che la direzione del moto vibratorio farà con quella della resistenza, che sarà sempre normale alla superficie del corpo vibrante. Savart fissò al centro di un disco di vetro e normalmente al piano di esso un tubo della stessa natura; immerse orizzontalmente il disco in una massa di acqua, e vi produsse vibrazioni normali strofinando il tubo nel senso della sua lunghezza: il suono così ottenuto riuscì più grave di quello che il disco similmente produceva nell'aria, e più che in questo fluido le linee nodali si disegnarono lontane dal centro del disco. Viceversa dalle vibrazioni longitudinali di una verga di ottone ottenne costantemente uno stesso suono nell'aria, nell'acqua e nel mercurio.

Dalla comunicazione del moto vibratorio al mezzo ambiente risulta ancora la differenza osservata da Faraday tra le linee nodali prodotte nell'aria e quelle che si presentano nel voto, qualora s'impieghi una polvere sottile e leggiera, come quella di licopodio. La cagione di questo fatto fu bentosto messa in chiaro da Savart: il quale facendo vibrare sott'acqua una larga lamina ed in modo di avere una linea nodale nel mezzo di

essa, vide formarsi ai due lati della linea due vortici resi visibili dal moto dei granelli di polvere galleggianti nel liquido: vortici analoghi si produrranno nell'aria quando si adoperi una polvere leggiera, e la loro azione perturbatrice farà fermare i granelli di polvere in punti diversi da quelli in cui si sarebbero arrestati nel voto.

Interferenze dei suoni.

201. Se due onde sonore, provvenienti dallo stesso centro vibrante e perciò eguali in lunghezza, vengano ad incontrarsi in modo che la semionda condensata dell'una si combaci colla semionda rarefatta dell'altra, le due onde si distruggeranno nel luogo d'incontro ed ivi il suono resterà spento; ma se in vece il combaciamento avvenisse tra le semionde omonime, i loro movimenti si sommerebbero insieme ed il suono risulterebbe più robusto.

La realtà di questi risultamenti, genericamente indicati col nome d'*interferenze*, è direttamente dimostrata col mezzo di un apparecchio proposto da Herschell ed attuato da Norremberg. L'apparecchio consiste in tubo prismatico AB (Fig.197) a base quadrata, aperto attraverso il muro di separazione di due camere e che ad angolo retto s'innesta col tubo CD di eguał sezione e chiuso nei due estremi. E questo secondo tubo è diviso secondo la sua lunghezza da un setto *ts* in modo che una corrente di aria non potrebbe andare da B in A senza dividersi nel luogo indicato dalla lettera *n* in due altre, di cui l'una dovrebbe andare per *nto*A, l'altra per *nso*A; e le lunghezze dei due bracci del tubo CD sono tali che il cammino *nto* supera di 12 pollici la lunghezza di *nso*. Or se da un tubo sonoro, lungo 12 pollici ed aperto nei due estremi, traggasi il suono più basso possibile, questo produrrà un'onda lunga 24 pollici (n° 199); e se quest'onda immettasi in B, dovrà dividersi in due arrivando in *n*, e quella che procederà per *nto* arriverà in *o* quando per *nso* vi giunge un'opposta fase di movimento; stante che le due fasi dell'onda si seguono colla differenza di 12 pollici di cammino, quant'è appunto l'eccesso del cammino *nto* sull'altro *nso*. Il suono dovrà dunque spegnersi in *o*; e realmente nulla ode l'osservatore situato in A. Ma se

per questo foro egl'introduca un diaframma che chiuda esattamente sia il cammino *nto*, sia *nso*, il suono si appaleserà immediatamente.

E se in vece del suono 1 il tubo dia il suono 2, ciò che si otterrà facilmente spingendovi l'aria con maggior forza, allora l'onda che avrà 12 pollici di lunghezza, entrando per B e dividendosi in *n*, perverrà in *o* per la via *nto* nel medesimo istante in cui per l'altra via *nso* vi giungerà un'identica fase di movimento. Il suono sarà dunque rinforzato in *o*; e nel fatto l'osservatore in A l'udirà più forte che quando lo riceveva per opera del diaframma ivi introdotto.

Un altro mezzo, ma indiretto, di verificare la interferenza dei suoni è quello delle lamine vibranti. Si abbia una lamina quadrata di ottone temperato (Fig. 169) fermata pel suo centro sopra un sostegno verticale, ed un tubo, come lo rappresenta la fig. 171, che superiormente sia chiuso da una membrana ben tesa su cui sia sparsa della sabbia assai fina. Si faccia vibrare la lamina in modo da produrre linee nodali secondo le sue diagonali, e che quindi resti divisa nei quattro triangoli A,B,C,D vibranti all' unisono. Allora vi si ponga sopra il tubo in modo che le sue gambe restino sospese su due dei triangoli opposti, come A e C ovvero B e D; si udirà un suono più forte, e si vedrà la polvere saltellare sulla membrana del tubo. Ma se le gambe del tubo passino su due triangoli contigui, come A e B, si vedrà succedere al suono il silenzio, ed al moto della polvere il riposo. Or la vibrazione prodotta nella lamina è tale che mentre i triangoli A e C si elevano, B e D si abbassano, e viceversa. Quindi allorchè il tubo coi suoi estremi sta su due triangoli opposti, riceve contemporaneamente o due onde condensate o due onde rarefatte, che incontrandosi nella parte superiore del tubo, vi producono una superficie nodale, e così spingono l'aria che vi è contenuta a vibrare in coincidenza della lamina. Perciò il suono di questa è rinforzato, ed è messa in vibrazione la membrana che chiude il tubo. Poggiandolo invece su due triangoli contigui, riceve da un lato onda condensata, dall' altro

rarefatta e queste due onde annullandosi nel loro incontro, non vi è più rinforzo di suono nè vibrazione della membrana.

Nei sopraddetti sperimenti è di somma importanza, per le considerazioni teoretiche che se ne possono dedurre, il fatto che nell'interferenza dei suoni i raggi dell'onda vanno per opposte vie quando il suono sparisce, e coincidono nello stesso cammino quando viceversa n'è rinforzato.

Metodo di Chladni per la misura della celerità del suono.

202. Eccetto l'aria e l'acqua che si possono avere sotto dimensioni comparabili allo spazio che il suono percorre in 1^s, rispetto ai rimanenti corpi il valore della celerità con cui trasmettono il suono non può esser dato che da una misura indiretta. La formola $v=\sqrt{\frac{e}{d}}$, quando sia nota l'elasticità e del corpo (n° 180), ci offre una misura di questa seconda specie; un'altra ne abbiamo nei valori dei suoni che si possono trarre dai solidi ridotti a verghe, e dai fluidi contenuti in tubi sonori. Con questo secondo metodo Chladni ha determinata la celerità del suono per diversi corpi. Dopo averli ridotti a forma di verghe che teneva sospese pel loro mezzo, egli le eccitava a vibrazioni longitudinali che avessero dato il suono più basso possibile, e così otteneva un'onda sonora lunga due volte il tubo; onda di eguale lunghezza otteneva ancora dalla vibrazione dell'aria in un tubo sonoro aperto nei due estremi e che rendeva il suono più basso. Queste due serie di onde egualmente lunghe percorrevano lo spazio, l'una nel solido l'altra nell'aria con velocità proporzionali ai numeri di vibrazioni fatte in un medesimo tempo, e quindi alle espressioni numeriche dei suoni prodotti. In una delle sue sperienze Chladni adoperò una verga di argento lunga 2 piedi del Reno ed un tubo sonoro di egual lunghezza, ed ebbe re_4 dal tubo, do_3 dalla verga: or essendo $re_1=\frac{9}{8}$, sarà $re_4=\frac{9}{8}.2^3=9.4$; ed essendo $do_3=4$, è chiaro che la velocità del suono nell'argento risultava 9 volte più grande di quella che si ha nell'aria. Con questo metodo Chladni ottenne i seguenti risultamenti.

SOSTANZE.	CELERITA' DEL SUONO.	SOSTANZE.	CELERITA' DEL SUONO.
Osso di balena . . .	$6\,^2/_3$	Legno di acajù	
Stagno	$7\,^1/_2$	— di ebano	
Argento	9	— di carpino	
Legno di noce		— di olmo	$14\,^1/_3$
— di tarso		— di ontano	
— di quercia	$10\,^2/_3$	— di betulla	
— di prugno		— di tiglio	
Rame giallo		— di ciriegio	
Tubi di pipe	10 a 12	— di salcio	16
Rame	12	— di pino	
Legno di pero		Vetro	$16\,^2/_3$
— di faggio rosso	12 a 13	Ferro o acciajo	
— di acero		Legno di abete .	$16\,^2/_3$ a 18

203. Sappiamo (n° 180) che la formola $v=\sqrt{\frac{e}{d}}$, applicata alla determinazione della celerità del suono in un fluido elastico, ha bisogno del fattore $\sqrt{\frac{c}{c'}}$, in cui c rappresenta la capacità termica del gas sotto una pressione costante, e c' l'analoga grandezza quando è costante il volume. È noto daltronde che facendo suonare dei tubi aperti nei due estremi, si può dedurre col metodo di Chladni dal grado del suono la sua celerità attraverso lo stesso gas che lo produce. Quindi se la velocità così ottenuta è che dinotiamo con w, si compari all'espressione $\sqrt{\frac{e}{d}}\sqrt{\frac{c}{c'}}$, si avrà l'equazione: Rapporto delle due capacità termiche di un gas.

$$w=\sqrt{\frac{e}{d}}\sqrt{\frac{c}{c'}},$$

donde sarà facile dedurre il valore di $\frac{c}{c'}$. Procedendo a questo modo Dulong ottenne i risultamenti che seguono.

NOMI DEI GAS.	VELOCITA' TEORETICA A 0°.	VELOCITA' SPERIMENTALE A 0°.	VALORI DI $\frac{c}{c'}$
Aria atmosferica . .	279,29	333,00	1,421
Gas ossigeno	266,00	317,17	1,415
— idrogeno . . .	1064,80	1269,50	1,407
— acido carbonico .	226,24	261,60	1,339
— ossido di carbon.	283,00	337,40	1,428
— ossido di azoto .	226,00	261,90	1,343
— oliofaciente . .	281,99	314,00	1,240

LIBRO SESTO.

ELETTRICITÀ E MAGNETISMO.

CAPO PRIMO.

MACCHINA ELETTRICA.

204. Sei secoli prima dell'era nostra Talete Milesio scopriva che l'ambra acquista per mezzo dello strofinio la proprietà di attrarre i corpi leggieri, come minuzzoli di paglia, piume, ecc. Ulteriori ricerche fecero conoscere un'identica proprietà in altre sostanze; e poichè l'ambra è detta *electron* in greco, perciò fu denominata *elettricità* la temporanea attrazione eccitata nei corpi per mezzo dello strofinio e riconosciuta primieramente nell'ambra. Definizione.

205. Se prossimamente all'estremo *a* del cilindretto metallico *ab* (Fig. 209) sostenuto dal piede di vetro *c*, tengasi sospesa la pallina *m* di midollo di sambuco, mentre a contatto dell'estremo *b* si porta un bastoncino di vetro o di cera lacca elettrizzato per mezzo dello strofinio, si vedrà bentosto la pallina *m* essere attratta dall'estremo *a*; ma se il cilindro *ab*, in vece di essere metallico, fosse di legno secco coverto di vernice, verun movimento si osserverebbe nella pallina *m*. Vi ha dunque dei corpi che danno passaggio alla virtù elettrica, altri vi si oppongono; i primi si dicono *conduttori*, isolanti i secondi. Conduttori ed isolanti.

Sono conduttori: i *metalli*, il *carbone cotto*, i *solfuri* e gli *ossidi metallici*, le *soluzioni saline* ed *acide*, i *corpi animali* e *vegetali*, ecc. Sono poi isolanti: il *solfo*, le *resine*, il *vetro*, la

lana, la *seta*, il *legno secco*, i *gas perfettamente asciutti*, i *liquidi oleosi*, le *sostanze grasse*, i *capelli*, le *unghie*, ecc.

In realtà tutti i corpi resistono alla trasmissione elettrica, ma la resistenza è piccola nei conduttori e grande negl'isolanti.

Deferenti e coibenti.

206. Se dopo aver elettrizzato un bastone di vetro, tocchiamo la parte strofinata, vedremo che dopo il contatto essa non cesserà di attrarre i corpi leggieri; al contrario la forza attrattiva comunicata al cilindro metallico *ab* (Fig. 209) dal vetro strofinato, sparirà interamente toccandolo con un dito. I corpi isolanti dunque ritengono con forza l'elettricità in essi eccitata e perciò son detti ancora *coibenti*, ed i conduttori come quelli che facilmente la cedono hanno ricevuto il nome di *deferenti*.

Da ciò si rileva che lo strofinio non potrà far apparire i segni elettrici in un cilindro di metallo, che l'operatore abbia nelle mani; stante che pel suo corpo la potenza elettrica sarà dispersa a misura che verrà prodotta. Ma se il cilindro sia fermato ad un sostegno di vetro, e strofinato in modo da non toccare la mano dell'operatore, i segni elettrici non tarderanno a manifestarsi. E per la stessa ragione avviene ancora che lo strofinio riesce inefficace in mezzo ad un'atmosfera umida, e su i corpi conduttori più che su gl'isolanti.

Donde poi risulta che la distinzione fatta dal Desagouliers di corpi *idioelettrici* (aventi elettricità propria) ed *anelettrici* (senz'elettricità), non è affatto ammissibile.

Due specie di elettricità.

207. Se in una cannuccia di legno (Fig. 198) orizzontalmente sospesa per mezzo di un filo di seta non torta introducasi un cilindretto di vetro *ab* elettrizzato, ed a questo si avvicini un altro cilindro di vetro anche elettrizzato, si vedrà il primo fuggire all'approssimarsi del secondo; ma se ad *ab* si avvicini una bacchetta elettrizzata di cera lacca, si vedrà il primo corpo correre all'incontro del secondo. Vi son dunque due diverse specie di elettricità: Dufay che faceva questa capitale scoverta nel 1733, denominò *vitrea* la prima, e la seconda *resinosa* per ragione dei corpi in cui le aveva ritrovate. Più tardi Francklin sostituì loro i nomi di elettricità *po-*

sitiva e *negativa* dietro alcune considerazioni teoretiche di cui parleremo in seguito.

Laonde il fatto quì sopra indicato può formolarsi nel seguente modo: *i corpi che hanno elettricità omonime si ripellono, e si attraggono quelli che hanno elettricità eteronime.*

È d'uopo pertanto osservare che un corpo non prende sempre la stessa specie di elettricità per mezzo dello strofinio: così il vetro diviene elettropositivo quando è liscio ed è strofinato con panno di lana, ed elettronegativo se sia scabroso o strofinato con pelle di gatto; e la ceralacca risulta elettronegativa o elettropositiva, secondo che viene strofinata dalla lana, o da un pezzo di esca o di sughero. Una sola cosa è costante in questo modo di svolgimento elettrico, ed è che uno dei due corpi, tra i quali avviene lo strofinio, prende l'elettricità positiva e l'altro la negativa; dimodochè non si può produrre una specie di elettricità senza che sorga anche l'altra. Quindi si osserva che se il cilindro di vetro *ab* (Fig. 198) è respinto da un altro cilindro della stessa sostanza e similmente elettrizzato, è poi attratto dal pezzo di panno che ha servito ad elettrizzarlo.

208. Ottone di Guerick, l'inventore della macchina pneumatica, compose nel 1670 la prima macchina elettrica con un globo di solfo, che mentre con una mano si faceva girare intorno ad un asse orizzontale, si elettrizzava coll'altra tenendola a contatto della sua superficie. Così egli potè osservare che dei corpi leggieri avvicinati al globo, mentre rotava, erano attratti e poi ripulsi, e che l'elettricità passava dal globo al corpo attratto talvolta sotto forma di una scintilluzza scoppiettante; fenomeno che Wall seppe poi riprodurre in modo più appariscente, e vederne l'analogia collo scoppio del fulmine. Invenzione della macchina elettrica.

Più tardi Hauksbée, avendo trovato che il vetro è atto a svolgere gran copia di elettricità, sostituì un globo di questa sostanza a quello di solfo: indi Winckler adoperò i cuscinetti per attuare lo strofinio; Boze aggiunse un cilindro di latta sospeso a cordoni di seta, per raccogliere l'elettricità svolta dal vetro; il P. Gordon sostituì un cilindro al globo di vetro;

e finalmente alle macchine a cilindro seguirono quelle a disco per opera primieramente di Martino Planta nella Svizzera, indi di Sigaud De la Fonde in Francia, ed in fine di Ramsden in Inghilterra.

La forma che ordinariamente si dà alle macchine a disco, è rappresentata nella fig. 210. Il disco *a* di vetro è fermato all'asse *b*, mobile per mezzo del manubrio *c*: l'asse è sostenuto da due montanti di legno, ciascuno interiormente provveduto di due cuscini contro cui il disco strofina nella sua rotazione. I cuscini sono di pelle imbottita di crini, e giova per un copioso svolgimento elettrico che siano spalmati di oro musivo. Il conduttore poi è un cilindro di ottone laminato, sostenuto da due colonne di vetro, che da un lato finisce a globo, e dall'altro con un arco terminato da due ganasce interiormente armate di punte, in mezzo alle quali rota il disco.

Va spesso unito al conduttore della macchina un indicatore della sua forza elettrica, denominato *elettrometro di Henley*, o *elettrometro a quadrante*, composto di un semicerchio graduato di avorio (Fig. 212) al cui centro è sospesa per mezzo di un filo di avorio la pallina *m* di midollo di sambuco; ed il semicerchio è fermato al conduttore mediante un bastoncino di legno, provveduto della ghiera *c* di ottone nel luogo in cui è a contatto della pallina *m*. Finchè la macchina non agisce, la pallina *m* sta a contatto della ghiera *c*; ma quando per la rotazione del disco il conduttore si carica di elettricità, questa comunicandosi dalla ghiera alla pallina, la ripelle sotto un angolo più o meno grande secondo la maggiore o minor dose elettrica diffusa sul conduttore. E quantunque non sia ammissibile la proporzionabilità della forza elettrica all'angolo di ripulsione della pallina, purtuttavia la semplice indicazione del più e meno rende utilissimo l'uso di questo elettrometro in tutte le sperienze in cui fa d'uopo servirsi di una macchina elettrica.

Nella macchina or descritta l'elettricità positiva che il disco acquista strofinando contro i cuscini, passa per opera delle punte sul conduttore. Ma questo passaggio è in parte impe-

dito, come in seguito vedremo, dalla necessaria presenza dell'elettricità negativa su i cuscini; quindi è che giova al miglior effetto della macchina che i cuscini disperdano la loro elettricità facendoli comunicare col suolo per mezzo di congiunzione metallica.

209. È questa una macchina a disco, le cui parti meglio rispondono alle condizioni che la scienza esige perchè sul conduttore si accumulasse più che sia possibile dell'elettricità svolta sul disco. La si vede prospetticamente rappresentata nella fig. 199. La palla *a* di ottone, sostenuta da una colonna di vetro, ne forma il conduttore: in essa sono impiantati per mezzo di verghette metalliche i due anelli di legno *d*,*d*, che nelle facce di rincontro sono in parte scanalati, ed ivi coverti di foglia di stagno e guerniti di una serie di sottili punte metalliche destinate a succhiare l'elettricità dal disco. I cuscini che hanno forma trapezoidale si veggono in basso del disco e sono sostenuti dal piede *h* di vetro: con essi comunica il cilindro *o* di ottone su cui si accumula l'elettricità negativa, quando la positiva si raccoglie sulla palla *a*; dimodochè la macchina di Winter, come quella di Van-Marum, dà ad un tempo le due elettricità. L'asse è di legno nel luogo di unione col disco, e da un lato si unisce alla manovella per mezzo del cilindro *i* di vetro, dall'altro è sostenuto dalla colonna *s* anche di vetro; così rimane perfettamente isolato. Un anello di legno con piede consimile si vede impiantato sulla sommità del conduttore; un filo metallico percorre interiormente l'anello ed il suo piede, ed è in contatto interiore colla palla *a*. Coll'aggiunta di questo anello le scintille che si traggono dal conduttore, divengono più lunghe e doppie. Con una macchina di questa specie, il cui disco non ha più che 47 centimetri di diametro, si hanno scintille lunghe da 23 a 26 centimetri; mentre non si hanno così lunghe da un'ordinaria macchina con un disco di un metro di diametro.

Macchina di Winter.

210. — *a*) Girando il disco di una macchina elettrica si sente un particolare odore, che parecchi hanno ancora inteso nei luoghi colpiti da fulmine. A viemeglio sentirlo gioverà

Sperienze elettriche.

piantare uno stiletto sul conduttore della macchina, e farvisi dappresso. Questo odore che i fisici attribuivano all'azione dell'elettricità sull'organo dell'odorato, Schönbein ha trovato esser l'effetto di un gas speciale prodotto dall'elettricità, da lui denominato *ozôno* e riguardato come un perossido d'idrogeno; ma che ricerche posteriori hanno fatto conoscere non esser altro che una speciale modificazione dell'ossigeno atmosferico.

— *b*) Facendo agire la macchina dopo aver fissata una punta metallica sul conduttore, si vedrà il pendolino dell'elettrometro di Henley rimanersi immobile, mentre avvicinando alla punta il concavo della mano la sentiremo colpita da un venticello che nel buio ci apparirebbe come un fiocco luminoso. Le punte hanno dunque il potere di disperdere l'elettricità dei corpi su cui sono impiantate, facendola fluire sotto forma di un fiocco di luce.

E se la punta invece di essere impiantata sul conduttore, gli fosse avvicinata mentre la macchina agisce, il pendolino dell'elettrometro cadrebbe, e nel buio apparirebbe sulla punta una stelletta luminosa. Le punte dunque hanno ancora il potere di attrarre l'elettricità, presentando una stelletta nel luogo dell'assorbimento.

Quindi potremo conoscere se l'elettricità esca o pur entri per una punta, vedendo se siavi il fiocco o la stelletta. E ciò per l'elettricità positiva; riguardo alla negativa poi il fenomeno procede in senso opposto; una punta fissata sul conduttore negativo di una macchina di Winter presenterebbe la stella, e darebbe in vece il fiocco se fosse allo stesso conduttore avvicinata.

Dalle quali cose si rileva perchè il conduttore sia armato di punte nell'estremo prossimo al disco; e perchè al miglior effetto della macchina giovi che la serie delle punte non si estenda oltre la zona strofinata dai cuscini; stante che nel caso opposto le punte situate fuori di essa (come per la prima volta fu osservato dal prof. Palmieri) presenterebbero il fiocco in vece della stella, vale a dire che esse disperderebbero parte dell'elettricità succhiata dalle altre.

— c) Approssimando la giuntura di un dito al conduttore di una macchina in azione, ne trarremo una scintilla pungente ed accompagnata da scoppiettio. La distanza che potrà superare, dipende dalla forza della macchina, dalle condizioni atmosferiche più o meno favorevoli allo svolgimento elettrico, e dalla natura e forma dei corpi tra i quali dovrà balenare. La grande macchina di Teyler dà scintille lunghe 24 pollici inglesi, grosse quanto il tubo di una penna da scrivere e serpeggianti come la folgore; quella costruita da Winter, secondo il suo sistema, ad uso della Scuola politecnica di Vienna dà scintille lunghe talvolta fino a 40 pollici. Ma queste distanze non si ottengono se non aggiungendo al conduttore per mezzo di un cilindretto metallico una pallina di due a tre pollici di diametro, e della stessa sostanza, e tirando la scintilla con una consimile pallina alquanto più grande e messa in comunicazione col suolo.

La forma della scintilla, specialmente quando si slancia a più pollici di distanza, è ordinariamente quella di una linea spezzata a zig-zag, che imita il serpeggiamento della folgore. Il suo colore poi è vario secondo la natura e densità del mezzo che percorre e secondo le sostanze tra le quali balena. Così la si osserva bianca nell'acido carbonico e nell'aria compressa, rossastra nel gas idrogeno e nell'aria rarefatta, verde nel vapore di etere o di mercurio; e nell'aria essa apparirà gialla, verde o cremisina, secondo che sarà tratta col carbone, col rame o coll'avorio.

Questa dipendenza del colore della scintilla dalla natura dei corpi tra quali si slancia e da quella del mezzo che percorre, è messa in chiaro dalle belle sperienze del Fusinieri, il quale ha veduto che la scintilla partendo da un conduttore di ottone, seco portava particelle di questo metallo ed altre di solo zinco nello stato di fusione; tra palle di oro, di argento, ecc. ha veduto ancora delle consimili trasmissioni: dietro una serie di scintille scoccate tra due palle, l'una di argento e l'altra di rame, egli ha trovato delle particelle di argento sulla palla di rame e delle particelle di rame su quella di argento.

Da questi e da altri fatti che in seguito esporremo, chiaramente apparisce la scintilla elettrica non esser altra cosa che la materia stessa dei corpi, da cui balena, divenuta incandescente per quel misterioso movimento molecolare che costituisce l'efficienza elettrica.

— *d*) Sopra una base di legno sieno fermate le due colonnette di vetro *a* e *b* (Fig. 213) provvedute di ghiere per le quali possano scorrere due verghette metalliche che da un lato finiscono nelle palline *m* ed *n* e dall' altro negli anelli *s* e *t*. Messe a contatto le due palline, si congiungano per mezzo di catenelle i cuscini coll'anello *s*, ed il conduttore coll'anello *t*. Allora girando il disco si vedrà il pendolino dell'elettrometro rimanersi immobile, nè veruna scintilla potrà tirarsi dal conduttore. Questa inazione della macchina purtuttavia non è che apparente, imperocchè basterà che sieno alquanto allontanate l'una dall'altra le due palline *m* ed *n*, per veder balenare tra esse una rapidissima serie di scintille, dalle quali rileveremo come quell'apparente inazione risultasse da un continuato movimento elettrico tra il conduttore ed i cuscini. E per definire la direzione di questo moto basterà interporre alle due palline la fiamma di una candela, la quale agendo a modo delle punte, farà sparire le scintille senz' arrestare il movimento elettrico ; e poichè vedremo la fiamma inclinarsi alla pallina congiunta ai cuscini, così sapremo che il moto elettrico va diretto dal conduttore ai cuscini, ossia dal disco a questi per lo mezzo del conduttore.

Or se questo fatto pongasi a confronto, e con quello della stelletta che si osserva su di una punta infissa sul conduttore dei cuscini, mentre quella conficcata sul conduttore della macchina è ornata del fiocco, e coi fenomeni diametralmente opposti che presentano le punte quando invece di essere infisse, stanno di fronte ai due conduttori, chiaramente vedremo come l'elettrizzazione stia in un movimento diretto dal corpo elettronegativo all'elettropositivo, e che da questo ritorna al primo, qualora gli si offra un mezzo di comunicazione. A mano a mano che andremo esponendo la serie dei fatti com-

ponenti il demanio dell'elettrologia, faremo osservare come tutti si possano coordinare a questa veduta, che prescinde da qualsiasi concetto sulla natura dell'elettricità.

Osserviamo ancora che l'immobilità del pendolino elettrometrico, quando nell'azione della macchina il conduttore sta in metallica congiunzione coi cuscini, ci dimostra che dalla combinazione delle due elettricità risulta lo *stato naturale* qualificato dall'assenza dei segni elettrici, non altrimenti che per la soprapposizione di due onde sonore eguali ed opposte sparisce il moto di ondulazione nel mezzo che lo conduce.

— *e*) La forza ripulsiva che definisce le elettricità omonime, può esser considerata nei suoi rapporti coll'attrazione molecolare mercè gli sperimenti che seguono — 1°. Preso un fascetto di fili di canape lunghi 4 a 5 pollici, e ligato nei due estremi si sospenda al conduttore di una macchina elettrica. Messo in giro il disco, si vedranno i fili curvarsi per la loro reciproca ripulsione fino a dare al fascetto una forma globulare — 2°. Facendo cadere un poco di gomma lacca rammollita dal calore in un foro scolpito sul conduttore di una macchina elettrica in azione, la vedremo gradatamente disperdersi in filamenti prodotti dalla ripulsione elettrica agente sulle sue molecole — 3°. Sospendasi al conduttore un vasellino metallico pieno di acqua, e sul cui fondo sia scolpito un foro così piccolo che il liquido non possa fluirne che per un lento stillicidio. Appena il disco sarà messo in azione, si vedrà da quel foro spicciare un sottilissimo getto, che per nulla aumenterà la portata che aveva il recipiente quando si scaricava a gocce, stante chè l'azione elettrica diminuendo la coesione nel liquido e la sua adesione alla sostanza del vase, ha fatto uscire successivamente quelle molecole che per lo innanzi dovevano comporre una goccia prima di separarsi dal recipiente— 4°. È notevole l'esperimento dell'*arganello elettrico*, il quale ci dimostra che quella sottilissima materia che si stacca dal conduttore sotto forma di scintilla, gode di una forza di espansione capace di effetto meccanico. L'arganello si compone di più fili di ottone, *a,b,c,d* (Fig. 215) terminati a punte

e tutti voltati ad angolo retto in un medesimo senso : i fili vanno poi tutti a riunirsi in un cappelletto o mobile sopra una punta verticalmente impiantata sul conduttore di una macchina elettrica. Quando questa è messa in azione, da ciascuna punta dell'arganello emerge un fiocco che espandendosi tra l'aria che incontra e la punta che lo emette , spinge questa in opposto senso, e fa camminare il filo metallico col gomito innanzi. Così l'arganello prende un moto di rotazione che va sempre più accelerandosi, perchè continuamente spinto dal flusso elettrico. Quindi è che l'arganello non si muove nè nel voto pneumatico , nè nell'acqua acidulata quantunque fosse tutto coperto di cera lacca eccetto le punte; imperocchè sì nell'uno che nell'altro caso manca la resistenza da cui dev'esser prodotta la reazione.

Macchina di Armstrong. 211. Sul finire di settembre del 1840 avvenne che in una macchina a vapore stabilita nella miniera di Cramlington presso Newcastle il vapore sfuggiva con violenza da una fessura apertasi tra la valvola di sicurezza e la parete della caldaia. Il meccanico Pattinson chiamato a riordinare la macchina, mentre con una mano sorregeva il peso della valvola tenendo l'altra esposta al getto di vapore , avvertì un senso di puntura di cui non seppe rendersi ragione. Ma dopo alquanti giorni disordinatasi di bel nuovo la macchina , si riprodusse lo stesso fenomeno; ed egli facendosi ad esaminarlo, trovò che tenendo una mano immersa nel getto di vapore ed avvicinando l'altra alla leva della valvola, se ne traevano parecchie scintille. Questo fatto meraviglioso, che svelava un nuovo generatore elettrico, diede origine a molte ricerche ; e tra i primi ad eseguirle fu Armstrong, il quale per poter variare a suo bell'agio gli sperimenti, ideò la macchina rappresentata nella fig. 216 , e perciò denominata *macchina idroelettica di Armstrong*. Essa si compone di un cilindro *a* di lamina di ferro , in cui ne sta un altro concentrico egualmente lungo e della metà meno largo. In questo secondo cilindro si accende il fuoco che deve riscaldare l'acqua contenuta nello spazio che lo separa dal cilindro esterno, ed in cui si versa pel foro che ri-

mane chiuso dalla valvola di sicurezza *b*. Il vapore passa dalla caldaia per mezzo del tubo *c* nei condotti *e*, che sono chiusi in una cassa rifrigerante *d* destinata a condensarne una parte in piccole gocce; quello poi che si svolge dal rifrigerante passa nel tubo fumario *h* per mezzo del condotto *g*. Il tubo *nn* è destinato all'introduzione di diverse sostanze in polvere sulla via percorsa dal vapore, a fine di poter osservare la loro influenza sullo svolgimento elettrico. Tutto l'apparecchio è poi sorretto da quattro colonne di vetro, che rendendolo isolato permettono poter raccogliere l'elettricità ordinariamente negativa della caldaja, mentre l'opposta elettricità del vapore si comunica al pettine del conduttore *l* del pari isolato.

La macchina non dà verun segno elettrico, sia quando il vapore, per essere aperta la valvola di sicurezza, si diffonde nell'atmosfera a misura che si forma, sia che resti interamente chiuso nella caldaia. Ma se quando il manometro indica una pressione di 7 in 8 atmosfere, si dia uscita al vapore movendo la leva *k*, allora si potranno aver forti scintille sì dalla caldaja che dal conduttore. A questi fatti aggiungendo che Armstrong ha ottenuto un eguale sviluppo elettrico sostituendo l'aria compressa al vapore, si ha quanto bisogna per chiaramente comprendere che l'elettricità dei bollitoi ad alta pressione non può dipendere dal cangiamento di stato dell'acqua. E Faraday con una serie di ricerche ha messo fuor di dubbio che la si debba interamente attribuire allo strofinio che i globetti di acqua cacciati violentemente dal vapore esercitano contro le pareti dei tubi di efflusso: quindi si rileva come la cassa refrigerante riesca indispensabile alla produzione del fenomeno.

Quantunque la macchina di Armstrong non abbia presentato altro di nuovo che una speciale forma di attrito, purtuttavia essa ha qualche vantaggio sulle ordinarie macchine elettriche. « Un apparato *vaporelettrico* (sono parole dello stesso inventore) agisce da se stesso, il che lascia all'operatore intera libertà per osservare i risultati. La sua alta temperatura rende la sua azione indipendente dall'umidità dell'atmosfera, la quale

diminuisce così notevolmente l'energia di una macchina elettrica; e la sua estrema semplicità rende presso che impossibile l'alterazione delle sue parti ».

Delle sperienze che Armstrong ha fatte colla macchina di sua invenzione rapportiamo le seguenti che hanno grande importanza per la teoria elettrica — Egli prese due vasi di vetro in cui versò dell'acqua distillata ; li congiunse mediante parecchi fili di cotone inumidito , e poi ne fece comunicare uno colla caldaja, l'altro col conduttore armato di punte ovvero col suolo. Dall'istante in cui la macchina fu messa in azione, il livello dell'acqua cominciò ad elevarsi nel vase comunicante colla caldaja , ubbidendo così a quella forza che spinge la materia ponderabile dal corpo elettropositivo all'elettronegativo — Egli dispose in fila dieci calicetti di vetro , in ciascuno dei quali aveva messo un piccolo tubo di vetro superiormente chiuso , ed in cui dalla parte inferiore entrava per un pollice e quarto un filo di platino. Il filo introdotto nel 1° calicetto comunicava colla caldaja , e quello del 10° col suolo ; i fili intermedii poi erano in congiunzione metallica a due a due, e le comunicazioni che in tal modo restavano interrotte tra il 1° calicetto ed il 2°, tra il 3° ed il 4° ecc., venivano attuate per mezzo di fili di cotone bagnati. Ogni tubo era pieno di acqua e colla sua estremità inferiore pescava nello stesso liquido contenuto nel calicetto: in alcuni tubi l'acqua era pura, negli altri conteneva delle sostanze in soluzione, ed era colorata in azzurro colla tintura di tornasole nei calicetti di posto pari, ed arrossita da un acido in quelli di posto impari. Facendo agire la macchina si vide in ciascun tubo elevarsi una serie di bollicine, provvenienti dalla decomposizione dell'acqua in ossigeno ed idrogeno; l'ossigeno si portò nei tubi di posto pari e l'idrogeno con un volume doppio in quelli di posto impari. Dopo qualche minuto si videro le soluzioni azzurre divenir rosse e le rosse azzurre; ed è degno di nota che il cangiamento di colore si mostrò primieramente nei calicetti 9° e 10°, vale a dire in quelli che furono i primi a ricevere l'azione di quella forza che nello svolgimento elettrico procede dal positivo al negativo.

CAPO SECONDO.

ELETTRICITÀ INDOTTA.

212. Sulla verticale che passa pel centro della palla *c* (Fig. 211) sta l'asse del cilindro metallico *ab*, e tra questi corpi e ad eguale distanza da essi giace orizzontalmente il disco di vetro *e*. Al cilindro sono sospesi, come indica la figura, due globetti di midollo di sambuco; e tutti questi pezzi sono fermati ad un sostegno per mezzo di bracciuoli di vetro fissi ad anelli scorrevoli lungo il comune sostegno. Fatto fondamentale.

Ponendo la palla *c* in comunicazione con una macchina elettrica, si vedranno divergere i pendolini a misura che la carica elettrica andrà crescendo sulla palla, e si vedranno poi ricadere alle loro prime posizioni di equilibrio, facendo cessare l'azione della macchina. E se mentre i pendolini divergono si avvicini loro una bacchetta di ceralacca elettrizzata, si vedrà l'inferiore venirne ripulso ed attratto il superiore. Il loro stato elettrico è dunque opposto; quello ch' è prossimo alla palla positivamente elettrizzata, possiede elettricità negativa, l'altro positiva.

La posizione del cilindro *ab* rispetto alla palla toglie ogni dubbio sull' origine delle opposte elettricità apparse su i due pendolini. Imperocchè la palla non potendo agire su di essi se non che attraendoli, ha dovuto sollecitarli a porsi per diritto sulle rispettive congiungenti i loro punti di sospensione col suo centro. Quindi per la sola azione della palla i pendoli anzichè divergere a destra avrebbero premuto contro il cilindro a cui sono sospesi: ma il fatto li mostra ripulsi a destra ed elettrici; dunque lo sono stati per opera del cilindro, che li ha elettrizzati per comunicazione; e la palla non ha agito che diminuendo la loro divergenza, più dell' inferiore che del superiore.

Per opera della palla il cilindro è dunque divenuto elettro negativo nella sua parte inferiore ed elettro positivo nella superiore. Ed in generale ogni corpo conduttore messo in presenza di un corpo elettrizzato, acquista elettricità opposta a quella del corpo agente nella parte che gli sta più vicina, ed elettricità consimile nella parte più lontana. E l'elettricità così acquistata dai corpi conduttori, ha ricevuto i nomi di *elettricità indotta*, *elettricità attuata* o *elettricità per influenza*.

Se quando la palla agisce sul cilindro, questo si tocchi con un dito si vedrà cadere il pendolino superiore ed acquistar maggior divergenza l'inferiore; e ciò perchè l'elettricità positiva, respinta dall'omonima della palla, è fuggita pel corpo dell'osservatore, mentre l'opposta elettricità è ritenuta sulla parte inferiore del cilindro dall'attrazione di quella del corpo agente. E per l'azione delle forze che fanno sparire l'elettricità positiva del cilindro e rimanere meglio concentrata verso l'estremo inferiore la negativa, avviene che l'esperimento risulti sempre lo stesso, qualunque sia il punto toccato sul cilindro. Quindi è che mal si sono avvisati quei fisici i quali han cercato conoscere lo stato del corpo attuato per mezzo del *piano di pruova* [1]; essi non han potuto raccogliere che elettricità identica a quella del corpo agente ed in quantità decrescente a misura che il piano di pruova si portava su punti più vicini al centro dell'influenza elettrica.

Dischi conjugati di Volta.

213. Immaginiamo due dischi metallici A e B (Fig. 218), che sostenuti da colonnette di vetro stiano paralleli tra loro ad una distanza tra certi limiti variabile a piacere dell'osservatore: siano inoltre i due dischi provveduti di pendolini, come indica la fig. ed il disco A sia posto in comunicazione col conduttore di una macchina elettrica. Facendo girare il disco della macchina, i due pendolini saranno ripulsi, e p più di q; e la differenza tra i due angoli di deviamento riuscirà più grande, come i dischi A e B saranno più lontani. Quindi se

[1] Il *piano di pruova* è un piccolo disco di carta dorata, fermato ad una bacchettina di vetro coverta di ceralacca.

indichiamo con la T la quantità elettrica diffusa sulla superficie del disco attuante, e con m una frazione vera, avremo sulla faccia b del disco attuato la quantità mT di elettricità negativa, ed una quantità presso che eguale di elettricità positiva sulla faccia b': ponendo ad esempio che p sia ripulso a 20° e q a 18°, sarà m=0,9. In questo stato toccando con un dito il disco B, si vedrà cadere il pendolino q, e p divenire meno divergente. La caduta di q deriva dal ritorno della faccia b' allo stato naturale, e la diminuita divergenza di p dall'esser mancata sulla faccia b' l'elettricità omonima a quella di A, e che impediva colla sua forza ripellente che l'elettricità di A fosse maggiore sulla faccia a che sull'altra a'. Tolto di mezzo questo impedimento, l'elettricità negativa mT di b richiamerà su a la quantità elettropositiva m^2T, facendola mancare su a'; quindi se allora per nuova carica si restituisca ad a' la sua tensione T, il disco A possederà realmente la quantità elettrica T+m^2T. Ma se a colla tensione T ha prodotta su b la quantità mT di elettricità eteronima, questa dovrà divenire mT+m^3T, quando la tensione di a sarà divenuta T+m^2T. Allora b', che trovavasi allo stato naturale prenderà la carica elettro positiva m^3T; e se questa sia dispersa per mezzo di un secondo contatto, la quantità elettro positiva che verrà ad accumularsi su a' sarà T+m^2T+m^4T, ch'esprimerà quella posseduta dal disco attuante allorchè sulla sua faccia a' sarà ripristinata la tensione T. Laonde toccando infinite volte il disco B e ripristinando dopo ogni contatto la tensione T sulla faccia a', ovvero (ciò che torna lo stesso) lasciando continua la comunicazione di B col suolo e di A col conduttore della macchina elettrica, avremo che quando a' mostrerà avere la tensione T, le quantità elettriche possedute dai dischi A e B saranno espresse dalle somme $\frac{T}{1-m^2}$ e $\frac{mT}{1-m^2}$ degl'infiniti termini delle due progressioni geometriche decrescenti :

$$\div\div\ T : m^2T : m^4T : m^6T : \ldots m^{2(n-1)}T,$$
$$\div\div\ mT : m^3T : m^5T : m^7T : \ldots m^{2n-1}T.$$

Così ponendo $m=0,9$ avremo $\frac{1}{1-m^2}=5,26$; quindi se indicheremo con φ e φ' le quantità elettriche corrispondenti a 20° sulla faccia a' e 18° su b' quando questa è isolata, quelle che si troveranno su a e b, allorchè b' starà in comunicazione col suolo ed a' avrà 20°, saranno espresse da $5,26\varphi$ e $5,26\varphi'$.

Or se stando così i due dischi A e B noi avviciniamo la mano ad a', ivi accorrerà una parte dell'elettricità di a, la quale non potendo perciò agire colla stessa forza di attrazione sull'eteronima elettricità di b, questa elettricità dovrà in parte fluire nel suolo, ed in tanta maggior copia per quanto la mano vieppiù approssimandosi ad a', vi trarrà maggior dose dell'elettricità accumulata sulla faccia a. Quindi avverrà che quando la mano sarà tanto vicina ad a' da tirarne una scintilla, la quantità elettrica così scaricata dal disco A sulla mano sarà, per le cose anzidette, presso che 5 volte più grande di quella che senza l'induzione avrebbe corrisposto ai 20 gradi dell'elettrometro a quadrante. E dietro queste considerazioni ci apparirà chiara la ragione dei seguenti fenomeni. — 1.° L'abbate Nollet osservava che una macchina elettrica dà scintille più vigorose quando vi si affollano molte persone intorno, purchè si sperimenti in un ambiente libero, a fine di evitare il contrario effetto della loro respirazione e traspirazione — 2° Wilke ed Epino situarono parallelamente ed alla distanza di un pollice e mezzo due tavole di legno di otto piedi quadrati di superficie e vestite di foglia di stagno. Le due tavole erano fermate a sostegni isolatori; e se tenendone una in comunicazione col conduttore di una macchina elettrica, si toccava con una mano la seconda tavola e si avvicinava l'altra alla prima, se ne aveva una scarica così forte da rimanerne scosso, mentre nulla di ciò si provava se la tavola in comunicazione col conduttore restava sola. — 3.° Con 12 bastoni di legno inargentati doppii 6 linee Volta compose un conduttore lungo 96 piedi e lo isolò sospendendolo a cordoni di seta. Se quando il conduttore comunicava con una macchina elettrica in azione,

gli si avvicinava una mano mentre coll'altra si stringeva un filo metallico che finiva in un suolo umido, si riceveva nell'atto della scarica una forte commozione. In questo sperimento il corpo dell' osservatore faceva da conduttore conjugato al sistema dei bastoni inargentati.

214. Abbiamo qui sopra veduto come per opera dell'induzione e sopra uno dei due dischi conjugati che abbia l'apparente tensione T, l'elettricità vi sia realmente accumulata nel rapporto di $\frac{T}{1-m^2}$ a T. Il sistema dei dischi conjugati è dunque un condensatore dell' elettricità. Ma la frazione $\frac{1}{1-m^2}$, che rappresenta la forza condensante dell'apparecchio, avrà un valore tanto più grande per quanto la frazione m sarà più piccola, vale a dire per quanto sarà più sottile lo strato coibente interposto e più grande la sua capacità specifica d' induzione. Questa capacità quantunque grande nell'aria, si trova purtuttavia congiunta alla somma mobilità delle particelle di questo fluido, e quindi alla facilità di neutralizzare lentamente le due opposte elettricità, quando queste sieno separate da piccolissimo intervallo. Perciò Volta ha sostituito alla falda di aria che separa i dischi conjugati una lamina di vetro, e così ha composto l'apparecchio rappresentato dalla fig. 221, ed a cui si è dato specialmente il nome di *condensatore*. È formato da due dischi di ottone A e B separati dal disco di vetro C, di un diametro più grande di quello dei primi: il disco A è mobile per mezzo di un manubrio isolante, e sopra un sostegno della stessa natura sta il disco B, il quale può comunicare col suolo per mezzo di una catenella metallica. Condensatore.

215. Se in vece d'interporre un disco di vetro tra due altri di metallo, incolliamo due foglie di stagno sulle opposte facce di una lastra di cristallo, avremo il *quadro magico* di Francklin, e se le due foglie s' incollino l'una sulla faccia interna di una giara di vetro e l'altra sull' esterna, otterremo la *boccia di Leyden* che presentò il primo fatto d'induzione elettrica. Quindi i dischi conjugati, il quadro magico e la boc- Boccia di Leyden.

cia di Leyden non sono che tre diverse forme di condensatore.

Nel 1746 Cuneo a Leyden volendo elettrizzare dell'acqua, la versò in un vase di vetro che sosteneva con una mano, mentre il liquido per mezzo di una catena metallica comunicava col conduttore di una macchina elettrica: dopo che questa ebbe agito per qualche tempo egli si fece a ritirare la catena dall'acqua, ed allora si sentì colpito da una forte commozione. L'esperimento con egual successo fu ripetuto da Muschenbroeck, professore in quella università, il quale ne fu talmente colpito che scrivendo a Réaumur per dargliene contezza, gli diceva che la corona di Francia sarebbe stata un lieve compenso al sacrificio di esporsi ad una nuova commozione. Pervenutane la nuova in Francia, Nollet replicò l'esperimento che aveva spaventato il professore olandese, ed alla presenza del Re fece sentire la scossa a 180 soldati della sua guardia. Ed in breve tempo il desiderio di ricevere la commozione divenne così comune che l'apparecchio prodigioso si vide passare dal gabinetto del fisico sulle panche del cerretano nelle pubbliche piazze.

È natural cosa che dopo l'invenzione di un apparecchio le prime ricerche siano dirette a renderne l'uso più facile e gli effetti più intensi. Così Wilson trovava il mezzo di accrescerne la forza, circondando il vase di vetro di uno strato di acqua che si elevasse al livello del liquido interno; il dottor Bevis sostituiva all'acqua le *armature metalliche*, vale a dire delle foglie di stagno che cuoprono le due superficie del recipiente a qualche distanza dall'orifizio; e finalmente Gralath a Danzica e Whatson in Inghilterra componevano le prime *batterie elettriche* congiungendo insieme le armature omonime di molte bocce.

Costruzione ed uso della boccia.

216. Le due foglie di stagno, di cui sogliono coprirsi le due facce di una boccia, debbono soddisfare alla condizione di poter stabilire una comunicazione tra l'interno e l'esterno di essa senza permettere che questo passaggio potesse per se medesimo attuarsi. Perciò le armature non si estendono

che a circa tre quarti dell'altezza della boccia, ed il resto si copre di ceralacca. Se la boccia è a largo collo (Fig. 224), sotto la qual forma prende il nome speciale di *giara*, non è difficile vestire di stagno anche la sua faccia interna; se poi la boccia fosse a collo stretto, allora si avrà l'armatura interna introducendovi della cannutiglia. Sì nell'uno che nell'altro caso il collo della boccia sarà chiuso da un turacciolo di sughero o di legno verniciato, pel quale si farà passare un bastoncino di ottone che toccando l'interno fondo della boccia, sporga fuori di qualche pollice e sia terminato in una pallina o *bottone*: se il filo metallico è curvato nella sua parte esterna prende il nome di *uncino*.

Volendo caricare la boccia, si farà comunicare il bottone col conduttore di una macchina elettrica e l'armatura esterna col suolo; e quando il pendolo dell'elettrometro a quadrante sarà divenuto stazionario, si avrà la certezza che la boccia è giunta alla sua massima carica. In questo caso la boccia suol dirsi *positivamente caricata*; e lo sarebbe *negativamente*, se messa sopra un sostegno isolatore si facesse comunicare l'armatura esterna col conduttore della macchina, l'interna col suolo, e dopo averla così caricata si togliesse all'armatura esterna l'elettricità positiva restata libera dopo la carica. Avendo una macchina elettrica a doppia elettricità, la carica negativa della bottiglia si avrebbe al pari della positiva colla sola differenza di far comunicare il bottone col conduttore negativo anzichè col positivo.

La scarica di una boccia si ottiene facendo comunicare le due armature per mezzo di un buon conduttore; al che soddisfa assai bene l'apparecchio denominato *eccitatore*, che si compone di due verghe di ottone *ab*, *bc* (Fig. 227) mobili a cerniera intorno al punto *b* e munite dei due manubrii isolanti *m* ed *n*. Quando la scarica si vuol far correre per più persone, è d'uopo che formino una catena tenendosi a vicenda per le mani, e che delle due persone formanti gli anelli estremi l'una tocchi l'armatura esterna mentre l'altra porta la sua mano sul bottone della boccia. Se il suolo su cui stanno è sec-

co, tutte riceveranno la scossa presso che egualmente forte; sopra un suolo semiconduttore la scossa riuscirà più forte per coloro che si trovano agli estremi della catena, e che sarebbero soli a riceverla se poggiassero sopra una base conduttrice, quale sarebbe un suolo assai umido. In generale la scarica va sempre pei migliori e più corti conduttori: così non proveremo presso che veruna commozione, se tenendo tra le mani un arco metallico le avviciniamo alle due armature di una boccia; al contrario la scarica avverrebbe quasi interamente pel nostro corpo se l'arco fosse di un legno secco.

Formando la boccia con un bicchiere di vetro vestito di ceralacca presso all'orlo, e che introdotto a combaciamento in un bicchiere di stagno, che servirà d'armatura esterna, ne riceva similmente un altro ad uso di armatura interna, allora si vedrà che caricato l'apparecchio e rimosse le due armature, queste non daranno veruna commozione, mentre se ne avrà una abbastanza forte, quando la boccia sarà montata di nuovo. Questo fatto dimostra che le contrarie elettricità nel vase di Leyden stanno aderenti alle due facce del vetro, e che le armature servono unicamente a diffonderle per quelle facce quando l'apparecchio si carica, ed a trasportarle su i punti di contatto nel momento della scarica. E da questa tendenza delle due elettricità di correre l'una all'incontro dell'altra attraverso la doppiezza del vetro, avviene che quando la boccia è fortemente caricata essa non si scarica interamente al primo comunicare delle armature fra loro, ma ne conserva invece un residuo capace di produrre una sensibile commozione.

Cariche conseguenti.

217. Quando il fatto scoverto a Leyden fu conosciuto in America, Francklin per averne una soddisfacente spiegazione, ideò che in tutti i corpi risedesse un fluido particolare, l'elettrico, il quale trovandosi in ragione della loro specifica capacità di contenerlo non dà segni della sua presenza, ma che appena vi è oltre questa capacità accumulato o sottratto fa che il corpo divenga elettropositivo nel primo caso ed elettronegativo nel secondo. Volle ancora che le particel-

le dell' elettrico si ripellessero tra loro, mentre sono attratte da quelle dei corpi. Così il fluido versato sull'armatura interna di una boccia deve espeller parte di quello esistente nell' esterna, e la boccia si carica; e quando si stabilisce una comunicazione tra le due armature, allora la natural tendenza del fluido elettrico all'equilibrio fa che corra dall'armatura interna all' esterna, e la boccia si scarica. Ed a rifermare il suo concetto, già di accordo col fatto di non potersi caricare una boccia perfettamente isolata, egli immaginò quel modo di unione di più bocce, che Beccaria denominò *per cariche conseguenti* e che i fisici francesi chiamano *charge par cascade.* Questo modo di unione, rappresentato nella fig. 223, consiste in sospendere all'armatura esterna di una 1ª boccia l'uncino di una 2ª, a questa similmente una 3ª, e così di seguito. Or pel fatto dell'induzione è facile comprendere come caricando la 1ª boccia col mettere la sua armatura interna in comunicazione col conduttore di una macchina elettrica, ne restino caricate tutte le altre; e ciò corrispondeva esattamente all' ipotesi del fisico americano, imperocchè vi si vedeva come il fluido elettrico cacciato dall' armatura esterna della 1ª boccia si accumulava nella interna della 2ª, e cacciato similmente dall' armatura esterna di questa si ricoverava nell' interna della 3ª, e così del resto.

218. Abbiamo di sopra accennato come Gralath e Whatson per accrescere la forza dell' apparecchio di Leyden pensassero di unire molte bocce insieme. Questa unione si ottiene congiungendo con bacchette metalliche i bottoni di molte bocce, che situate in una cassa vestita internamente di foglia di stagno, si trovano ancora congiunte per le loro armature esterne. Così la batteria equivale ad una sola boccia le cui armature equivalessero in superficie a quelle di tutte le bocce riunite. Batterie elettriche.

Il grado di massima carica che può ricevere una data batteria, dipende dalla forza della macchina destinata a caricarla, e dallo stato dell'aria ambiente. Rappresentando con m la quantità elettrica che la macchina può somministrare nell' u-

nità di tempo, e con $\frac{1}{n}$ la frazione di carica che nello stesso tempo va dispersa nell'aria ambiente, è chiaro che dopo n unità di tempo la carica sarà mn e la perdita $mn \times \frac{1}{n}$ ossia m; ma questa rappresenta la quantità elettrica ricevuta in ogni unità di tempo; dunque a contare dal tempo n la carica cesserà di crescere, poichè ciò che la batteria riceve dalla macchina pareggia ciò che essa disperde nel mezzo ambiente. Or il prodotto mn, ch'esprime la massima carica, avrà un valore tanto più grande, per quanto lo sono i suoi fattori m ed n, vale a dire per quanta maggior elettricità la macchina dà in un dato tempo, e per quanto più piccola è la frazione di carica che si perde nello stesso tempo.

Eccitatore universale.

219. Per molti sperimenti relativi agli effetti delle batterie elettriche è assai comodo l'apparecchio di Henly, denominato *eccitatore universale*. È composto nel seguente modo: sopra una base di legno (Fig. 227) si elevano tre colonnette di vetro, la media delle quali sostiene una tavoletta orizzontale che a piacere dell'osservatore si può elevare od abbassare; e le due laterali finiscono superiormente in due ghiere di ottone sormontate da globetti metallici per cui passano a strofinio dolce due bacchette anche di ottone. Volendo sottomettere un corpo all'azione di una forte scarica, lo si porrà sulla tavoletta dell'eccitatore a contatto delle estremità delle due bacchette metalliche sostenute dalle colonne laterali, e poi al modo consueto si chiuderà il circuito colle due armature della batteria.

Effetti delle scariche.

220. Nel n° 210 abbiamo esposto alcuni fatti tendenti a dimostrare con quanta forza l'elettricità possa contrastare alla coesione molecolare. Or la boccia di Leyden, accumulando una quantità elettrica di molto superiore a quella che può trovarsi sopra ogni altro conduttore egualmente esteso, ha potuto offrirne pruove più decisive. E tra le molte sperienze all'uopo eseguite scegliamo le seguenti.

— 1ª. All'armatura esterna di una giara ben carica e la cui

superficie armata sia di circa un piede quadrato, si applichi un pezzo di cartone; poggiandovi una delle branche dell'eccitatore a cerniera e portando l'altra a contatto del bottone, la scarica passerà attraverso il cartone, lasciandovi un foro con orlo alquanto sfrangiato. Bucheremo similmente una lamina di vetro ponendola tra due punte metalliche messe in comunicazione colle due armature di una batteria.

— 2ª. Preso un cilindretto di legno e fattivi penetrare pei centri delle basi due fili metallici fino ad un quarto di pollice di distanza, si vedrà la scarica fendere con violenza il cilindretto di legno, quando i capi opposti dei fili saranno messi in comunicazione colle armature di una batteria. Facendo passare i fili per due turaccioli che chiudano gli orifizii di un forte tubo di vetro pieno di acqua, nell'atto della scarica il tubo sarà franto e l'acqua dispersa. Beccaria vide similmente spezzarsi una palla di vetro massiccio nel cui centro aveva fatto penetrare una goccia di acqua, colla quale aveva messi a contatto i capi di due fili metallici.

— 3ª. Se il calore consiste in una vibrazione molecolare di un fluido speciale diffuso in ogni parte dello spazio, non recherà meraviglia che per opera di una scarica elettrica restino fusi ed anche bruciati i fili metallici per cui passa. Se per un filo di ferro abbastanza sottile e teso tra due pinzette di metallo sostenute da colonne di vetro, si faccia passare la scarica di una batteria, si vedrà il filo disperdersi in globetti incandescenti lanciati in tutti i sensi. Con una batteria di quaranta piedi quadri di superficie armata Singer pervenne a bruciare un filo di ferro lungo 18 piedi e del diametro di $\frac{1}{250}$ di pollice. E se la lunghezza del filo sia abbastanza ridotta potrà bastare la scarica di una sola giara a farlo bruciare.

221. Le più belle ricerche istituite coll'apparecchio di Leyden sono state certamente quelle dirette a misurare la celerità con cui l'elettrico attraversa lo spazio; celerità che conosceremo dover esser grandissima, se facendoci a ripetere la 1ª delle sperienze descritte nel n° precedente, porremo il carto- Celerità del moto elettrico.

ne liberamente sospeso tra le due aste dell'eccitatore universale, imperocchè lo vedremo rimanersi perfettamente immobile nell'istante in cui sarà bucato dall'impeto della scarica.

I primi tentativi di una misura diretta di questa velocità furono fatti nel 1747 da Whatson coll'aiuto di parecchi dotti inglesi. Si fecero percorrere alla scarica elettrica dei lunghi circuiti, fin della lunghezza di quattro miglia; si usarono tutte le avvertenze perchè la scarica non ne deviasse; si ebbero pruove convincenti che l'elettrico l'ebbe realmente percorsi, ed intanto in due interruzioni fatte nel circuito prossimamente alle due armature, si vedevano balenare nell'atto della scarica due scintille perfettamente contemporanee. L'elettrico aveva dunque percorso quattro miglia inglesi in un tempo infinitesimo.

Ecco tutto ciò che si sapeva della celerità dell'elettrico quando nel 1834 Wheatstone leggeva alla Società Reale di Londra un'importante memoria sullo stesso argomento. Le prime sue ricerche furono dirette a determinare la celerità con cui la scintilla percorre l'intervallo dei conduttori tra tra quali balena. L'apparecchio all'uopo usato si vede nella fig. 228. Un disco *h* di legno era fermato pel suo centro all'asse *g* di una macchina di rotazione; sulla sua circonferenza stava la palla *b* di ottone che per mezzo della foglia *s* di stagno comunicava coll'asse *g*; e nel mezzo dello stesso disco si elevava immobile la colonna *d* di vetro, la quale portava un braccio di ottone destinato a sostenere il sistema delle due palle *c* ed *a* anche di ottone, e che distavano dall'asse di rotazione quanto la palla *b*. La scintilla che la palla *c* traeva da una macchina elettrica, poi balenava tra le palle *a* e *b*, quando l'ultima dalla rotazione del disco era trasportata sotto la prima. L'apparecchio compiva 50 giri a secondo, e poichè era valutabile $\frac{1}{20}$ della circonferenza descritta da *b*, così diveniva sensibile $\frac{1}{1000}$ di secondo. Or se la scintilla avesse impiegata questa frazione di secondo in percorrere la distanza di 4

pollici che separava le due palle *a* e *b*, allora formato a norma della composizione dei moti il parallelogrammo *abcd* (Fig. 229), essa avrebbe dovuto seguire il cammino *ac* se fosse stata discendente, o *bd* se ascendente: Wheatstone in vece la vide sempre nella direzione *ab* che seguiva quando la palla *b* era ferma. La scintilla percorreva dunque la lunghezza di 4 pollici in un tempo minore di $\frac{1}{1000}$ di secondo.

Per rendere valutabile una più piccola frazione di tempo Wheatstone si servì di uno specchietto piano che faceva 50 giri a secondo intorno ad un asse verticale, mentre a 10 piedi di distanza dall'asse delle scintille lunghe 4 pollici scoccavano dal conduttore di una vigorosa macchina elettrica. È noto che quando il piano di uno specchio rota di un certo angolo, l'immagine da esso riverberata gira per un angolo doppio, e perciò se lo specchio faceva 50 giri a secondo, nello stesso tempo l'immagine della scintilla doveva percorrere 100 circonferenze ciascuna di 10 piedi di raggio, e poichè per una simile circonferenza ogni mezzo grado è poco più di un pollice, così per 10 circonferenze si avevano più di 72000 pollici. Quindi se la scintilla avesse impiegato $\frac{1}{72000}$ di secondo in percorrere i 4 pollici della sua lunghezza, la sua immagine sarebbe apparsa sotto forma di un parallelogrammo obbliquo avente 1 pollice di base e 4 di altezza con lati inclinati alla base sotto un angolo di circa 75°,31'. Wheatstone al contrario la vedeva sempre verticale e quando lo specchio era in riposo e quando faceva 50 giri a secondo; i 4 pollici dunque erano percorsi dalla scintilla in un tempo minore di $\frac{1}{72000}$ di secondo.

Quanto poi alla celerità con cui l'elettrico percorre un filo conduttore, Wheatstone si fece a misurarla nel seguente modo. Un filo di rame lungo mezzo miglio e doppio $\frac{1}{15}$ di pollice fu disteso in tante linee parallele in un lunga galleria, in

cui stavano sopra una stessa orizzontale e distanti tra loro di $\frac{1}{5}$ di pollice sei palline metalliche isolate (Fig. 231). Le palline a e c' erano unite ai capi estremi del filo, che nel suo mezzo era interrotto dalle palline b e b' a cui era congiunto; e finalmente delle due palline a' e c l'una comunicava coll'armatura interna, l'altra coll'esterna di una boccia, la quale ricevendo continua elettricità da una macchina faceva colle sue scariche spontanee balenare delle scintille tra le coppie di palline aa',bb',cc'. Così l'esperimento riusciva indipendente da qualunque veduta teoretica, imperocchè sia che la scarica proceda con moto continuo dall'armatura positiva verso la negativa, sia che parta nel tempo stesso dalle due armature, la scintilla che balena tra le palline bb', non potrà giammai esser contemporanea a veruna delle due rimanenti. Le immagini delle due scintille erano riflesse da uno specchietto di acciaio di un pollice di diametro, e che per apposito meccanismo faceva 800 giri a secondo; e l'asse di rotazione era provveduto di uno speciale eccitatore che scaricava la boccia quando l'immagine della scintilla poteva trovarsi nel campo visibile dall'osservatore. Messo in azione l'apparecchio, le tre scintille apparvero secondo le tre linee ═══, ovvero secondo le tre altre ═══, secondochè lo specchio girava in un senso o nell'altro. La qual cosa dimostrava — 1° Che le scintille estreme erano contemporanee, e che in conseguenza la scarica partiva nel medesimo istante dalle due armature della boccia — 2° Che la scintilla media era in ritardo, e che perciò l'elettrico impiegava un certo tempo a percorrere la metà della lunghezza del filo; tempo che Wheatstone per mezzo della differenza angolare delle tre immagini trovò essere circa $\frac{1}{10}$ di secondo per un filo egualmente doppio e lungo quanto la circonferenza dell'equatore terrestre — 3° Che le scintille avevano una certa durata, che l'autore valutò ad $\frac{1}{24000}$ di secondo per mezzo dell'allungamento della loro immagine.

Con questo nuovo apparecchio Wheatstone rifece i suoi esperimenti sulla celerità della scintilla che scocca dal conduttore di una macchina elettrica; ma quantunque lo specchio fosse stato portato a tale celerità di rotazione da poter valutare $\frac{1}{1000000}$ di secondo, purtuttavia l'immagine della scintilla compariva sempre la stessa, fosse stato in moto o in riposo lo specchio. Per questa somma celerità dell'elettrico ad alta tensione si comprende come avvenga che durante il chiarore di una scarica fatta nel bujo gl'insetti sembrino fissi nell'aria, le corde vibranti si veggano immobili sotto la forma che hanno in quello istante, ed i getti di acqua presentino sotto la loro forma reale le gocce da cui risultano.

La differenza che si osservò nella durata della scintilla, secondochè si otteneva da una boccia o dal conduttore di una macchina elettrica, fu giustamente attribuita dal Wheatstone alla poca capacità del filo conduttore a trasmettere con un sol atto la scarica elettrica da una pallina all'altra.

222. Per conciliare la partenza contemporanea della scarica dalle due armature di una boccia, come risulta dai sopraddetti sperimenti di Wheatstone, coll'idea (n° 210,—*d*) di un movimento diretto dal corpo elettropositivo all'elettronegativo, osserviamo che in forza della legge d'induzione deve necessariamente avvenire che come un capo del filo conduttore si avvicina al bottone dell'armatura interna, così viene ivi richiamata una parte dell'elettricità su essa diffusa; in conseguenza viene a diminuire la forza inducente sull'armatura esterna, e porzione dell'elettricità ivi dissimulata risulterà libera. E perciò mentre una scintilla scocca dall'armatura interna sopra un capo del filo conduttore, un'altra ne partirà dall'altro capo del filo, slanciandosi sull'armatura esterna; ed i due movimenti procederanno con eguali celerità verso il mezzo del filo, non altrimenti che due moti vibratorii verso il loro nodo. Osservazione

E nella contemporaneità della scarica dalle due armature sta poi la ragione per la quale la commozione, quando la sca-

rica va per un circolo di persone, riesce massima per quelle che formano gli anelli estremi della catena, e minima per quelle che stanno nel mezzo; imperocchè perdendosi nel suolo e nell' aria ambiente parte dell'elettricità che corre da un individuo all' altro, necessariamente le quantità elettriche che partono in opposte direzioni dai due estremi della catena, formeranno due serie decrescenti, i cui termini minimi andranno a confondersi nel mezzo del circuito.

Elettroforo. 223. Se in vece di un disco di vetro, che per essere eminentemente igrometrico lascia scorrere l' elettricità pel velo umido che lo ricuopre, si armasse uno strato di resina, sostanza che tenacemente ritiene l'elettricità che vi è stata eccitata o semplicemente trasfusa, si avrebbe allora un coibente armato la cui carica potrebbe lungamente durare. Questo è appunto il caso dell'*elettroforo* inventato da Volta; apparecchio composto di una stiacciata di resina, ottenuta col versarla liquida sopra un disco di legno o di metallo rilevato di qualche linea nell'orlo, e di uno *scudo* ossia di un disco di metallo od anche di legno foderato di foglia di stagno, e proveduto di un manubrio isolante. Quando si vuol mettere in azione l'apparecchio si comincia dallo strofinare con pelle di gatto la superficie della stiacciata, indi vi si poggia sopra lo scudo, e lo si tocca con un dito. Si sentirà una puntura prodotta dall'elettricità omonima a quella della resina, e cacciata dall' induzione sulla faccia superiore dello scudo: le due elettricità eteronime essendo lasciate in presenza l' una dell' altra sulle facce a contatto dello scudo e della resina. Quindi alzando il primo, l'elettricità positiva, di cui è carico, diverrà libera, e si slancerà sotto forma di scintilla sul primo corpo conduttore che troverà nella sua sfera di esplosione. Ripetendo più volte il contatto della resina collo scudo e di questo col dito, si potranno ottenere altrettante scintille; e così l'elettroforo può far le veci di una macchina elettrica.

CAPO TERZO.

ELETTROMETRIA.

224. Ai tempi di Gilbert e di Ottone di Guerick la distanza più o meno grande, alla quale un corpo elettrizzato poteva attrarre un ago mobile intorno ad un asse verticale, era un metodo elettrometrico soddisfacente pel primo periodo della scienza, poichè non si cercava che di conoscere il numero dei corpi capaci di acquistare la virtù elettrica. Si conobbe in seguito che all'attrazione elettrica seguiva la ripulsione, e d'allora in poi ogni nuovo *elettroscopio* (indicatore di elettricità) non è stato che un nuovo mezzo di renderla più appariscente. Così Dufay lasciava pendenti i due capi di un filo di canape sopra un conduttore isolato, e dalla quantità della loro divergenza arguiva la forza elettrica comunicata al conduttore: ai due capi del filo Canton sospese due palline di sughero, e Bennet sostituì due laminette d'oro. Questo apparecchio (Fig. 200) si compone di una piccola campana di cristallo, poggiata sopra una base di legno : la campana ha un collo chiuso da una ghiera di ottone, che superiormente finisce in un'asta sormontata da pallina, ed inferiormente porta una piccola pinzetta che tiene sospeso due laminette di foglia d'oro. E poichè queste sotto una forte ripulsione andrebbero ad attaccarsi alla faccia interna della campana, perciò vi sono due colonnette di ottone terminate da palline, e fermate a due piccole verghe dello stesso metallo sporgenti fuori dell'apparecchio, per mezzo delle quali si possono più o meno avvicinare tra loro, e scaricare dell'elettricità che ricevono dal contatto delle laminette d'oro. L'aria della campana vuol essere asciutta, e perciò vi si pone un vasellino con qualche sostanza disseccante ; ma sarà meglio costruire l'apparecchio, come oggi si usa in Germania, con una caraffa di cristallo, che ben dis-

Elettroscopio di Bennet.

seccata al momento di chiuderne il collo colla ghiera di ottone, si trova sempre allestita per gli sperimenti, ed offre ancora il vantaggio di offrire molta corsa alle foglie di oro prima che si potessero slanciare sulla parete interna del recipiente.

Sostituendo due fili di paglia alle laminette d'oro si ha l'elettroscopio di Volta.

Elettroscopio condensatore. 225. All' elettroscopio di Bennet Volta aggiunse il suo condensatore per potervi successivamente accumulare quelle piccole quantità elettriche, le quali non potrebbero altrimenti divenir sensibili, che sommandone molte insieme. All' armatura metallica di un ordinario elettroscopio a foglie d' oro è fermato con vite il disco di rame *ab* (Fig. 222) coverto di vernice nella faccia superiore; su questo disco ne poggia un altro anche di rame *de*, verniciato nella faccia inferiore e che si può togliere per mezzo di un manubrio isolante. Quando si vuol esplorare lo stato elettrico di un corpo, fa d' uopo menarlo a contatto dell'appendice *c* al disco inferiore, perciò denominato *collettore*, e mettere lo *scudo*, ossia il disco superiore, in comunicazione col suolo. Così facendo, l' elettricità comunicata al collettore agirà sullo scudo attraendo l'elettricità eteronima, e respingendo l'omonima nel suolo per mezzo della conduzione già stabilita; in tal modo le due elettricità, l'inducente e l'indotta, resteranno in presenza l'una dell'altra senza potersi neutralizzare, e le loro cariche potranno essere accresciute per mezzo di ripetuti contatti del corpo in esperimento sull'appendice *c*. Se dopo ciò si tolga via lo scudo, allora l' elettricità comunicata al collettore non più ritenuta a contatto della vernice di cui è coverto, si diffonderà in tutto il sistema metallico, di cui il collettore fa parte, e si appaleserà colla ripulsione delle foglie di oro.

Elettroscopio di Melloni. 226. Uno dei più sensibili e più comodi elettroscopii è quello ideato da Melloni. Si compone di una cassa cilindrica di ottone (Fig. 201) chiusa superiormente da un disco di cristallo. Nella cassa entra il tubo di vetro *abcd* coverto di ceralacca e che racchiude un filo metallico il quale con un capo

si unisce alla pallina *s* portante il disco di ottone *k*, e sull'altro si congiunge ad una specie di tazzetta metallica *pq* (Fig. 202). A questa secondo un diametro del suo orifizio stanno congiunti i due fili di ottone *m*, *n* che sono fermi sopra un disco graduato che divide quasi per metà l'altezza della cassa. Dentro la piccola tazza *pq* ne pende, senza toccarla, un'altra capovolta *v*, per mezzo di un filo di seta non torta attaccato alla sommità del tubo *g*; ed al fondo suo sta unito il filo di ottone *hl*, a cui si dà una debole forza direttrice, impiantandovi perpendicolarmente un piccolissimo ago calamitato.

Orientato l'apparecchio in modo che i fili *mn* ed *hl* sieno paralleli tra loro ed a piccolissima distanza, supponiamo che si avvicini al disco *k* un corpo elettropositivo. Il disco ne verrà elettrizzato per influenza, l'elettricità negativa resterà sulla sua superficie anteriore, la positiva pel filo metallico che mette capo alla pallina *s* sarà respinta nella tazza *pq* e nei fili *m*, *n*. Questa elettricità respinta agirà dal canto suo sulla tazza *v*, attirerà sulla superficie prossima l'elettricità negativa da essa prodotta per influenza e respingerà la positiva sul filo *lh*. Così questo filo ed *mn* si troveranno carichi di una stessa elettricità, ed il primo come mobilissimo sarà ripulso dal secondo. Similmente i due fili *lh* ed *mn* si caricherebbero di elettricità negativa se un corpo elettronegativo fosse avvicinato al disco *k*.

Questo elettroscopio, al pari di ogni altro, si può caricare di una data specie di elettrità, avvicinando al disco *k* un corpo avente elettricità contraria, e toccando con un dito momentaneamente il disco prima di allontanarne il corpo attuante.

227. Ciascuno degli elettroscopii di sopra descritti suol esser provveduto di un quadrante graduato, non perchè fosse lecito dedurre la ragione delle forze elettriche dai gradi di ripulsione prodotti nell'istrumento, ma semplicemente per conoscere se in un caso la ripulsione sia più o meno grande che nell'altro, la qual cosa torna utilissima in molte ricerche. Il Bilancia di Coulomb.

solo elettroscopio che meriti il nome di *elettrometro* (misuratore dell'elettricità) è la *bilancia di torcimento* di Coulomb, costruita sul dato (n° 69) che la forza necessaria a torcere un filo metallico di un certo numero di gradi sia proporzionale all'angolo di torcimento. Essa si compone di una cassa cubica (Fig. 220) formata da cinque lastre quadrate di circa 6 decimetri di lato; e poggiata sopra una base di legno. Da un foro scolpito nel centro della lastra superiore si eleva un tubo B di cristallo, lungo 5 decimetri e largo 8 centimetri, il quale termina superiormente in un apparecchio micrometrico destinato alla misura degli angoli di torcimento. Lungo l'asse del tubo scende un filo di argento, teso dal cilindro C di rame, e che tiene orizzontalmente sospeso un filo di gomma lacca terminato da un piccolo disco di carta dorata. Per un secondo foro B fatto sulla stessa lastra superiore va introdotta nella cassa una pallina di rame all'altezza del disco di carta dorata, e sospesa ad un sottile cilindro di vetro, e la distanza di questo dal filo di argento è tale che girando il micrometro posto in cima al tubo B, il disco di carta può venire a contatto della palla di rame. Finalmente nel piano orizzontale che passa pel centro della pallina è incollata sulle facce laterali della cassa una zona di carta che porta delle divisioni equivalenti all'angolo di un grado, il cui vertice sia nel filo di argento, e lo zero sulla retta che unisce il filo al centro della pallina di rame: una metà della zona sta sulla faccia esterna della cassa, l'altra sull' interna, affinchè da un solo punto l'osservatore potesse leggere sull' intera faccia graduata.

Volendo sperimentare con questa bilancia, fa d'uopo prepararla nel seguente modo. Si comincerà col rendere asciuttissima l'aria contenuta nella cassa, ponendovi dei vasellini con cloruro di calcio: indi per mezzo delle viti che sostengono l'intero apparecchio si livellerà la base in modo che il filo di argento occupi precisamente l'asse del tubo B; della qual cosa sarà facile assicurarsi guardando dalle divisioni medie di due facce contigue della cassa, se il filo apparisca projettato sulla divisione media della faccia opposta. In fine si porterà il

disco di carta dorata a contatto della pallina, girando il pezzo del micrometro che tiene sospeso il filo di argento.

Preparata così la bilancia, si tolga la pallina di rame dalla cassa e tenendola pel manubrio isolante a cui è fermata, si porti a contatto del corpo, di cui si vuol esplorare lo stato elettrico, indi si restituisca al suo posto. Se il disco di carta dorata sarà ripulso, avremo la pruova dell'elettricità del corpo, e ne avremo in pari tempo la misura per mezzo dei gradi di torcimento patito dal filo di sospensione, indicati dal deviamento angolare del disco di carta dorata.

228. Per semplice analogia Epino aveva ammesso che le attrazioni e ripulsioni elettriche seguissero la ragione inversa dei quadrati delle distanze dai centri di azione: questa analogia è divenuta un fatto per mezzo della bilancia di torcimento. In uno de' suoi sperimenti Coulomb vide il disco di carta dorata ripulso a 36° dalla pallina in conseguenza di una certa carica elettrica ad essa comunicata; volle ridurre questa distanza a 18°, e trovò necessario di torcere il filo di argento di altri 126°, dimodochè il torcimento totale sommava a 144°. L' intensità della ripulsione si accrebbe dunque nella ragione di 36 a 144, vale a dire di 1 a 4, mentre la distanza diminuiva in quella di 2 a 1. La ripulsione elettrica segue dunque la ragione inversa dei quadrati delle distanze. *Legge delle distanze.*

Egli è vero che in questo esperimento le distanze avrebbero dovuto esser misurate secondo le corde anzi che gli archi, e che sarebbe stato necessario considerare che se la ripulsione opera secondo la corda dell' arco descritto, il torcimento va in vece per la tangente; ma queste correzioni riuscirebbero di sì poco momento per archi di 18° e 36°, da non valere la pena di calcolarle.

Coulomb sperimentò ancora sulle attrazioni elettriche per mezzo della stessa bilancia. Egli comunicò una specie elettrica al disco di carta dorata dopo averlo allontanato di molti gradi dallo zero delle divisioni col girare il micrometro; indi diede elettricità contraria alla pallina, e facendo variare il torcimento del filo di sospensione pervenne a mantenere i due

corpi elettrici a diverse distanze: le quantità di torcimento si trovarono essere nella ragione inversa dei quadrati delle distanze.

Questa legge delle attrazioni elettriche fu riferмata dallo stesso Coulomb col metodo delle oscillazioni. Egli comunicò una delle due elettricità ad un globo di metallo perfettamente isolata, e l'altra ad un piccolo disco di carta dorata fermato all'estremità di un ago di gomma lacca, orizzontalmente sospeso ad un filo di seta non torta. L'ago fu portato a diverse distanze dal centro del globo, per ciascuna si numerò la quantità di oscillazioni che l'ago faceva in un dato tempo quando veniva allontanato dal suo luogo di equilibrio, e questi numeri comparati tra loro si trovarono essere inversamente proporzionali alle distanze dell'ago dal centro del globo. Così chiamando n ed n' i numeri di oscillazioni fatte in tempi eguali alle distanze d e d', si aveva:

$$n : n' = d' : d.$$

Ma indicando con f ed f' i valori dell'attrazione elettrica alle distanze d e d', si aveva ancora (n° 51):

$$f : f' = n^2 : n'^2 ;$$

quindi:

$$f : f' = d'^2 : d^2 ,$$

ossia che l'attrazione elettrica decresce in ragione dei quadrati delle distanze.

CAPO QUARTO.

ELETTROSTATICA.

Luogo dell'elettricità in un conduttore.

229. Si renda isolato un vase cilindrico di metallo, e si faccia comunicare la faccia interna del suo fondo col conduttore di una macchina elettrica in azione; indi s'interrompa la comunicazione colla macchina, e fatto scendere nel cilindro

un piccolo disco di carta dorata sospeso a filo di seta, con esso se ne tocchino più punti della superficie interna. Estratto il disco dal cilindro senza toccarne l'orifizio, e portato a contatto di un sensibile elettroscopio, si troverà perfettamente privo di elettricità; ma se in vece si faccia toccare al disco un qualche punto della superficie esterna, si vedrà ritornarne elettrico; e se allora si porti a toccare di nuovo l'interno del cilindro, vi deporrà per mezzo di una piccola scintilla l'elettricità che avrà tolta dalla superficie esterna — L'elettricità in un corpo conduttore sta dunque tutta sulla sua faccia esterna, ed ivi da sè stessa si trasporta a qualunque punto del conduttore sia comunicata.

Questo esperimento, che forma la base dell'elettrostatica, è dovuto a Beccaria il quale denominò *pozzo elettrico* il vase cilindrico, e *secchia* il piccolo disco di carta dorata. Indi fu ripetuto e con egual successo da Coulomb sopra un recipiente sferico di metallo.

230. Si abbia un recipiente ellettico di cristallo (Fig. 217) provveduto nei due estremi di ghiere metalliche per cui passino due verghette della stessa sostanza e terminate da palline. Una delle ghiere sia provveduta di vite per adattarsi al meato di una macchina pneumatica, e di un rubinetto per chiudere ed aprire una via all'aria esterna. Fatto il voto nel recipiente, si ponga la pallina superiore in comunicazione col conduttore di una macchina elettrica, l'inferiore col suolo; ed allora facendo girare il disco si vedrà una corrente di luce porporina partire dal punto più basso della pallina superiore, dirigersi verso l'inferiore e circondarla di un'atmosfera luminosa. Invertendo le comunicazioni col conduttore della macchina e col suolo, resterà invertita la direzione del moto, e l'atmosfera luminosa si vedrà intorno alla pallina superiore. E se in fine si faccia rientrar l'aria a poco a poco nel recipiente, il moto della luce elettrica diverrà gradatamente discontinuo, fino a ritornare all'ordinaria forma di scintilla, quando l'aria avrà riacquistata la densità che aveva. Pretesa influenza della pressione dell'aria.

Comparando questi fenomeni alla tendenza dell'elettricità

di portarsi sempre alla superficie dei corpi conduttori, i fisici ne han dedotto ch'essa dovesse restarvi per effetto della pressione atmosferica e che verun' attrazione esistesse tra la materia elettrica e quella dei corpi conduttori. Ed in questa opinione vieppiù si rifermarono, quando videro che Poisson ponendola per vera riproduceva col calcolo i risultamenti che Coulomb per via di sperienze avera ottenuti intorno al modo con cui l' elettricità si distribuisce sulla superficie dei corpi conduttori. Intanto Hawksbée, Gray, Dufay, ecc. avevano trovata l' elettricità durevole nel voto; e se ai loro sperimenti potevasi obbiettare di esser stati eseguiti su corpi coibenti, non potrà dirsi altrettanto di quelli fatti da Harris, il quale trovò che una palla di rame di 20 pollici di diametro, elettrizzata ed isolata perfettamente in un grande recipiente, conservava la sua tensione elettrica anche dopo aver sottratto $\frac{14}{15}$ dell'aria ivi contenuta. Nè diversi sono stati i risultamenti ottenuti da Becquerel coll'apparecchio rappresentato dalla fig. 214, simile a quello che usava Dufay nelle sue ricerche intorno all'elettricità nel voto. Nella parte superiore di un piccolo elettroscopio A a foglie d'oro stava fermata una sottile lamina metallica sulla quale ne giaceva un'altra di vetro; e l'elettroscopio riposando sul disco C adattabile ad una macchina pneumatica, era coverto da una campana sotto la quale stavano dei vasellini pieni di cloruro di calcio per disseccare lo spazio interno. Per una ghiera poi che chiudeva il collo della campana, passava l'asta *bc* che facendosi rotare intorno a sè stessa, strofinava per mezzo del cuscinetto *d* la sottoposta lamina di vetro: così questa si elettrizzava ed agendo per influenza sulla lamina metallica su cui era adagiata, faceva divergere le foglie d'oro dell'elettroscopio. Questa divergenza che avrebbe dovuta essere fugace nel voto, se l' elettricità fosse stata mantenuta sulle foglie d' oro dalla pressione atmosferica, riuscì in vece così durevole, che Becquerel in una delle sue sperienze la rinvenne sensibile 10 giorni dopo averla prodotta.

Se dunque l' elettricità rimane sulla superficie di un corpo conduttore, ciò non dipende dall' azione meccanica dell' aria; ed in conseguenza quando essa nel voto pneumatico va da un conduttore all'altro sotto forma di una corrente luminosa, come nell'apparecchio indicato dalla fig. 217, il suo moto è interamente prodotto dall' attrazione che l' elettricità del corpo attuante ha verso l'opposta elettricità indotta nell'attuato, senza che la mancata pressione atmosferica vi prendesse alcuna parte. E se la rientrata dell'aria produce la discontinuità del moto, dimodochè l'elettricità non passa da un conduttore all'altro se non col salto di una scintilla, ciò dipende dalla colbenza del fluido interposto ai due conduttori, e che non può esser vinta dalla tensione elettrica se questa non giunga ad un certo grado.

231. Al bottone di un elettroscopio di Bennet si sostituisca un vasellino metallico contenente una catenella della stessa sostanza , alla quale sia ligato un filo di seta per poterla sollevare a piacere dell' osservatore; e si comunichi al vasellino una dose sufficiente a produrre una forte divergenza nelle foglie d'oro dell'elettroscopio. Se allora tirando il filo di seta si sollevi un capo della catenella, si vedrà la divergenza delle foglie farsi minore, e poi tornare di nuovo a quel che era, dopo che la catenella si sarà lasciata ricadere al suo posto. Questo ingegnoso sperimento di Francklin dimostra come dalla figura di un conduttore dipenda il modo con cui l'elettricità si distribuisce sulla sua superficie. *Dipendenza dalla forma del conduttore.*

232. Conosciuto che l'elettricità risiede tutta sulla superficie di un corpo conduttore e che essa vi si distribuisce variamente a norma della figura del corpo, Coulomb prese a determinare colla sua bilancia la legge di questa distribuzione. *Risultamenti ottenuti da Coulomb.*

Egli vide primieramente che per dare il giusto valore ai risultamenti sperimentali faceva d'uopo saper valutare le perdite che l' elettricità soffre e per via dei sostegni e per quella del mezzo ambiente, stante che non si conosce corpo abbastanza isolante da resistere al passaggio di qualunque carica elettrica, ed il mezzo ambiente, secco che sia, non impedisce pertanto che l'elettricità lentamente vi si disperda.

Per misurare gli effetti di queste due cagioni di perdita elettrica, Coulomb cominciò dal separarli; e per comprendere come avesse potuto far servire a tal uopo la sua bilancia, immaginiamo che in luogo della pallina di rame vi fosse sospeso un corpo elettrico per mezzo di un filo di gomma lacca, e che questo filo disperdesse parte dell'elettricità del corpo. È chiaro che aggiungendovi un secondo filo eguale al primo, la perdita diverrebbe maggiore e la diminuzione elettrica più celere; ma se l'aggiunta del secondo filo non accelerasse la diminuzione elettrica avvenuta col primo, si avrebbe una pruova che il corpo quanto al mezzo di sospensione è perfettamente isolato. Così Coulomb ha conosciuto che un filo di gomma lacca di mezza linea di diametro e lungo 18 a 20 linee isola perfettamente una palla di sughero di 5 a 6 linee di diametro e debolmente carica di elettricità; ed in generale egli ha trovato che per isolare compiutamente, le lunghezze dei sostegni debbono seguire la ragione dei quadrati delle forze elettriche.

Ottenuto così il mezzo d' isolare il corpo rispetto al sostegno, fu agevole coll' ajuto della bilancia la misura della dispersione prodotta dal mezzo ambiente; e dalle molte sperienze all' uopo eseguite Coulomb dedusse le tre leggi che seguono.

— 1ª In un'aria calma, che ha temperatura e stato igrometrico costanti, le dispersioni elettriche in una serie di tempi eguali sono rappresentate da una frazione costante dell' energia che il corpo aveva al cominciare di ciascun tempo. In conseguenza conoscendo l'intensità elettrica al principio dell'esperimento e la perdita sofferta nella 1ª unità di tempo, sarà facile calcolare l'elettricità residua dopo un tempo qualunque t. Ed in vero chiamando R_0 la ripulsione elettrica esistente nella bilancia all'origine del tempo, ed $\frac{R_0}{a}$ la parte perduta nella 1ª unità di tempo, al cominciare della 2ª unità la ripulsione sarà espressa da

$$R_0 - \frac{R_0}{a} = R_0\left(1-\frac{1}{a}\right).$$

La perdita durante la 2ª unità sarà in conseguenza: $\frac{R_0}{a}\left(1-\frac{1}{a}\right)$, e la carica al cominciare della 3ª unità sarà:

$$R_0\left(1-\frac{1}{a}\right)-\frac{R_0}{a}\left(1-\frac{1}{a}\right)=R_0\left(1-\frac{1}{a}\right)^2;$$

quindi la carica R_t dopo t unità di tempo sarà espressa da:

$$R_t = R_0\left(1-\frac{1}{a}\right)^t.$$

In una delle sperienze di Coulomb la ripulsione che a principio era di 150°, scese a 50° dopo 45 minuti, e la perdita fu di $\frac{1}{41}$ durante il primo minuto. Ponendo questi numeri nell'ultima equazione, si ha:

$$R_t = 150\left(\frac{40}{41}\right)^{45};$$

la quale espressione calcolata per mezzo dei logaritmi dà $R_t = 49°,24'$ circa, quantità poco diversa dai 50° dati dall'esperienza.

— 2ª L'umidità atmosferica aumenta la celerità della dispersione, la quale è di $\frac{1}{41}$ per minuto in un'aria secca, e va fino a $\frac{1}{10}$ circa in un ambiente umido.

— 3ª Sotto deboli cariche elettriche la dispersione è indipendente dalle dimensioni e dalla forma e natura del corpo.

Determinato il metodo di correzione che poteva rendere comparabili i risultamenti dell'esperienza, Coulomb si fece a ricercare le leggi della distribuzione elettrica e sulla superficie di un solo conduttore e su quelle di più conduttori a contatto tra loro. Egli è vero che sarebbe stato necessario poter

separare l'elemento di superficie da esplorarsi per poi recarlo nella bilancia di torcimento ed ivi osservare la ripulsione prodotta sul disco di carta dorata, già carico di omonima elettricità; ma Coulomb seppe trovare l'equivalente di questo metodo inattuabile. Egli prese un piccolo disco di carta dorata, e lo fermò ad un sottile cilindro di gomma lacca tale da rendere il disco perfettamente isolato; e questo *piano di pruova* che toglieva dall'elemento di superficie, che toccava, una quantità elettrica proporzionale a quella che vi era, veniva poi trasportato nella bilancia di torcimento. Egli aveva cura che in ogni pruova l'angolo di ripulsione fosse stato sempre lo stesso, affinchè le forze riuscissero proporzionali agli angoli di torcimento patito dal filo di sospensione.

Per evitare nella successiva esplorazione dei diversi punti della superficie la correzione della perdita dovuta all'aria ambiente, Coulomb si serviva del seguente metodo di compensazione. Egli toccava col piano di pruova uno dei punti che voleva esplorare, e ne determinava la tensione colla bilancia; faceva altrettanto rispetto ad un secondo punto, e lasciato scorrere un intervallo di tempo eguale a quello passato tra i due contatti, egli tornava a toccare il primo punto osservato, prendeva la media della 1ª e 3ª tensione e così otteneva quella che si sarebbe avuta se il primo punto fosse stato esplorato nel medesimo istante del secondo. Così procedendo egli ha trovato:

— 1° Che l'intensità elettrica è la stessa sopra tutti i punti di una superficie sferica.

— 2° Che in un' ellissoide allungata di rotazione l' intensità elettrica è massima nei vertici e minima nell'equatore della superficie, e che la ragione di questi valori limiti varia secondo quella degli assi della superficie generatrice.

— 3° Che la tensione elettrica su di una lamina rettangolare o su di un cilindro che abbiano lunghezza assai grande rispetto alla larghezza, si conserva presso che costante dal mezzo fino ad una certa distanza dalle basi donde poi cresce rapidamente e tocca un massimo nella superficie limite.

— 4° Che i conduttori che hanno forma e volumi eguali e si toccano simmetricamente, riportano dal contatto eguali tensioni elettriche. Così tra due cilindri eguali l'elettricità sarà egualmente ripartita, sia che i cilindri si tocchino per le loro basi, sia che confondano la loro generatrice rettilinea.

— 5° Che tra corpi conduttori che hanno una stessa figura e diverso volume, la ripartizione elettrica avviene in modo che il corpo più piccolo ne toglie in proporzione una quantità maggiore. In una delle sue sperienze Coulomb sospese nella bilancia una sfera di pollici $6\frac{1}{4}$ di circonferenza, ed avendole data una carica elettrica vide che il disco del bilanciere si fermava ad una certa distanza dalla sfera mercè 145° di torcimento. Indi a contatto di questa sfera ne portò un'altra che aveva 24 pollici di circonferenza, e trovò che allora non bisognavano più che 12° di torcimento per conservare l'indice alla medesima distanza. La piccola sfera pel contatto della grande aveva dunque perduta una quantità elettrica proporzionale a $145°-12°=133°$; ed il rapporto tra il resto della carica e la quantità perduta fu quella di 12 a 133 ossia di 1 a 11. Intanto la superficie della piccola sfera era a quella della grande come $(6+\frac{1}{4})^2$ a 24^2, ossia come 1 a 14,7. Quindi si comprende come le scintille riescano più vigorose quando in vece di tirarle dalla grande sfera terminale del conduttore di una macchina elettrica, si fanno scoccare da quella piccola sfera che a modo di appendice suole aggiungersi alla prima.

— 6° Che una sfera messa a contatto di un cilindro riterrà una dose elettrica tanto più piccola per quanto il cilindro sarà più sottile. Coulomb adoperò una sfera di 8 pollici di diametro, e tre cilindri che lunghi 30 pollici avevano i raggi delle loro basi di 12 linee, di 6 ed 1. Prendendo ad unità la tensione media della sfera egli trovò che quelle dei cilindri erano rispettivamente 1,3; 2; 9. Donde si rileva la ragione dell'attività delle punte in disperdere l'elettricità accumulata sopra un conduttore, e l'utilità di far terminare il conduttore di una macchina elettrica con una sfera di diametro maggiore di quello del cilindro che lo costituisce, affinchè su quest'ultimo si accumuli una maggior quantità elettrica.

Figure di Leichtemberg. Immagini di Masson.

233. Le ricerche sulla distribuzione elettrica non potevano avere altro subbietto che i corpi conduttori, stante che l'elettricità portata su i coibenti aderisce ai punti cui viene comunicata, e non si espande sulla loro superficie se non sia condotta da quel velo di umido che potrà esservi disteso. Così il vetro, sostanza eminentemente igroscopica suol diffondere sopra una parte più o meno grande della sua superficie l'elettricità comunicata ad un punto di essa, ma se il vetro sia stato perfettamente disseccato, l'elettricità non altrimenti potrà scorrervi sopra, se non condotta per mezzo di un filo metallico. Le resine al contrario che non hanno forza igroscopica sensibile, conservano l'elettricità aderente ai punti di comunicazione, come ce lo dimostrano le così dette *figure* di *Leichtemberg*. Le quali si ottengono disegnando sopra una stiacciata di resina due sistemi di linee, l'uno con un conduttore di elettricità positiva, l'altro con uno di elettricità negativa, e poi spargendovi sopra una miscela di polvere di minio e solfo per mezzo di un soffietto in cui sia stata introdotta. Si vedranno allora i granelli di minio, che coll'agitare del soffietto sono divenuti elettropositivi, rimanere attratti sulle linee segnate dal conduttore di elettricità negativa, ed i granelli elettronegativi del solfo aderire a quelle descritte dal conduttore di elettricità positiva.

Novella pruova di questo fatto si ha nelle immagini di Masson. Sparsa che sia di sottilissima polvere, di tripoli per esempio, una medaglia asciutta e netta, si pulisca con un po' di cotone nelle parti rilevate della figura, indi si rovesci perchè della polvere penetrata nelle cavità ne cada la parte superflua. Così capovolta si ponga la medaglia sopra un piano di mastice, e sopra di essa si passi con un bastone di ceralacca fortemente elettrizzato: questo agendo per influenza sul metallo farà che la polvere cacciata dalle cavità vada ad attaccarsi al mastice, e vi disegni la figura scolpita nella medaglia. Un eguale risultamento si avrebbe ancora usando il metodo di Morren che consiste in sostituire un velo di umido alla polvere e poi applicare la medaglia sopra una lastra già inumidita col-

l'alito; l'immagine resterà disegnata da quei piccolissimi globetti liquidi che l'elettricità spingerà sulla lastra, cacciandoli dai solchi scolpiti sulla medaglia.

CAPO QUINTO.

DIVERSE SORGENTI DI ELETTRICITÀ.

234. Oltre lo strofinio vi hanno altri mezzi meccanici valevoli a produrre svolgimento elettrico. Uno di questi mezzi è il distacco di superficie aderenti: così avviene che separando celeramente delle lamine da un pezzo di mica, si mostra nel buio una certa luce fosforica; e se prima di separarle le lamine siano state congiunte a manubrii isolanti, allora avvicinandole immediatamente dopo il distacco ad un sensibile elettroscopio, si troverà l' una essere elettropositiva, l'altra elettronegativa. E se dopo averle ridotte allo stato naturale, si riuniscano per le facce di contatto e si sottopongano a tale pressione che le renda di bel nuovo aderenti, si vedranno dietro una nuova separazione riuscire egualmente elettriche. Distacco di superficie aderenti.

Nè dal solo distacco delle parti di uno stesso corpo, ma eziandio dalla vinta adesione di corpi eterogenei è talvolta prodotto uno svolgimento elettrico. Così Wilke osservava che staccando il solfo dai vasi di vetro in cui è stato fuso e poi si è solidificato, il vetro si trova elettronegativo ed il solfo elettropositivo. Il cioccolatte, l'acido fosforico fuso, il protocloruro di mercurio sublimato presentano analoghi fenomeni quando vengono separati dalle pareti dei recipienti in cui si sono solidificati.

E nella stessa categoria va messo ancora il fatto osservato dal prof. Libes. Questi dopo aver disteso sopra un disco di legno un pezzo di taffetà gommato, vi soprappose premendolo un disco di metallo provveduto di manubrio isolante: i due dischi rimasero aderenti, e staccando pel suo manubrio il se-

condo dal primo, egli trovò il taffetà elettropositivo ed il metallo elettronegativo. E se in vece del distacco usava lo strofinio di un disco contro l'altro, i due corpi riuscivano inversamente elettrizzati.

Pressione. 235. Basta premere tra le dita un cristallo di spato islandico, perchè divenga elettrico. Haüy dopo avere scoverta questa proprietà dei cristalli di spato, la trovò ancora nella gomma elastica ed in qualche altra sostanza; e più tardi Becquerel ritornando sullo stesso argomento scovrì che tutti i solidi si possono elettrizzare per mezzo della pressione. Facendone dei piccoli dischi di qualche millimetro di diametro, nei loro centri s'impianteranno normalmente a manubrii isolanti; e prendendo questi in mano si premeranno i dischi l'un contro l'altro, indi separati celeramente si porteranno a contatto di un sensibile elettroscopio, ed allora si troverà l'uno essere elettropositivo e l'altro elettronegativo.

L'esperimento non riesce coi solidi conduttori; e quando l'uno di essi almeno sia isolante la quantità dell'elettricità prodotta dipenderà dal grado di pressione e dalla celerità del distacco.

Percossa. 236. Il Prof. Perego battendo dei pezzi isolati di marmo su pezzi di bosso, abete, rovere e noce, ebbe segni di elettricità positiva nei minerali e negativa nei pezzi di legno. Ottenne ancora svolgimento elettrico percuotendo minerali con minerali e legni con legni; nè le sostanze animali, come corna di bue, avorio e tartaruga rimasero inerti, quando vennero percosse con sughero, con diverse specie di legno ed anche con corpi minerali. Quindi si può comprendere come le montagne di ghiaccio galleggianti nei mari polari, svolgano talvolta al dir dei navigatori una viva luce, quando spinte da venti contrarii vanno con impeto ad urtarsi le une contro le altre.

Fluidi contro solidi. Filtrazione. 237. Spingendo con un manticetto una corrente di aria contro l'armatura metallica di un elettroscopio di Bennet, si vedranno divergere le foglie di oro. Similmente si elettrizza il mercurio, allorchè stando in un calicetto di vetro, vi s'immerga a più riprese un fascetto di piume o un pezzo di feltro;

e se l'ambiente sia freddo e secco, l'elettricità potrà riuscire così forte da scintillare all'avvicinarsi di un conduttore. Una forte dose di elettricità avremmo ancora raccogliendo in un recipiente isolato il mercurio filtrato attraverso di un pezzo di feltro o di velluto. E per tutte queste cose è chiara la ragione per cui si ha sviluppo di luce in un barometro agitato nel buio.

238. Nel 1782 Volta trovandosi a Parigi, fece in compagnia di Lavoisier e Laplace il seguente sperimento. Un braciere con carboni mezzo accesi fu posto in un giardino sopra una lastra metallica isolata che per mezzo di un filo di ferro comunicava con un elettroscopio condensatore: dopo che il vento ebbe a sufficienza animata la combustione, fu rotta la comunicazione della lastra coll'istrumento, e questo fu trovato carico di elettricità negativa. E lo stesso effetto ottennero ancora situando sulla lastra dei recipienti in cui furono versati acido solforico allungato e limatura di ferro. Azione chimica.

Più tardi Pouillet raccolse non solamente l'elettricità negativa del carbone, ma eziandio la positiva della fiamma. Fermata una lamina metallica orizzontale al disco collettore di un elettroscopio condensatore, egli vi adagiò per la base un cilindro di carbone deferente; di cui aveva accesa la sommità; e dopo averne alimentata per un certo tempo la combustione mercè una corrente di aria, tolse via il carbone, ed alzato lo scudo trovò il disco collettore carico di elettricità negativa. Rifece poi l'esperimento col porre il carbone in comunicazione col suolo, mentre l'appendice metallica dell'elettroscopio riceveva i prodotti della combustione, e trovò l'apparecchio carico di elettricità positiva. — In generale ogni combinazione chimica è accompagnata da sviluppo elettrico più o meno abbondante.

239. Da tempo immemorabile era noto nell'isola di Ceylan che un cristallo di tormalina gittato nel fuoco ne attira le ceneri. Pel commercio degli Olandesi nelle Indie questo minerale fu conosciuto in Europa; Lemery ed Epino dimostrarono che la forza attrattiva eccitatavi dal calore non era altro che Azione termica.

elettricità; e dalle ricerche dei fisici posteriori si ebbero i seguenti particolari.

— 1° Perchè una tormolina divenga elettrica fa d'uopo che la sua temperatura sia crescente o decrescente; e quando il suo grado di calore sarà divenuto costante, conserverà per qualche tempo l'elettricità svolta durante la continua variazione della sua temperatura.

— 2° Facendo variare egualmente il calore in tutta la lunghezza della tormalina, una metà di essa diverrà elettropositiva, l'altra elettronegativa. La metà divenuta elettropositiva per accrescimento di calore, sarà resa elettronegativa per raffreddamento; quindi Bergmann ha potuto ottenere che una stessa elettricità fosse in tutta la lunghezza del cristallo, riscaldandone una metà mentre ne raffreddava l'altra.

— 3° Quando le due metà di una tormalina si trovano con opposte elettricità, la tensione non è la stessa in tutta la lunghezza del cristallo; essa è nulla nella sezione media e presenta due *poli* o punti di massima azione verso gli estremi. E se allora la tormalina si divida e suddivida in due parti eguali, ogni porzione si presenterà coi due poli l'uno elettropositivo e l'altro elettronegativo; donde risulterebbe che la polarità elettrica di una tormalina è qualità molecolare, quando anche Brewster non avesse ciò dimostrato con un semplicissimo ed ingegnoso esperimento. Egli ridusse una tormalina in polvere finissima, che poi depose sopra una lastra di vetro; la polvere non mostrò veruna coesione od adesione, finchè la temperatura della lastra non fu variata. Ma riscaldando il vetro si vide che la polvere vi aderiva, e si agglomerava quando si rimoveva con un corpo secco.

Oltre la tormalina vi sono altri cristalli che divengono elettrici per mezzo del calore. Ed è notevole che i luoghi che vi occupano i poli elettrici sono contraddistinti da difetto di simmetria nella figura del cristallo.

CAPO SESTO.

MAGNETISMO.

240. Da tempo remotissimo è nota l'esistenza di un minerale, che ha la proprietà di attrarre il ferro. Questo minerale che la Chimica insegna essere una combinazione di ossigeno e ferro, e che conosciamo sotto il nome di *calamita*, era denominato *magnes* dai Greci; e quindi ne sono venute le espressioni di *magnetismo*, *fenomeni magnetici*, *forze magnetiche*, ecc. Definizioni.

Le calamite tratte dal seno della terra si distinguono coll'aggiunto di *naturali* da quelle che l'arte sa costruire e perciò dette *artificiali*. Le quali poi si suddividono in *permanenti* e *temporanee*, secondo che hanno una forza durevole o fugace, e prendono per la loro diversa forma i nomi di *aghi magnetici*, *sbarre magnetiche*, ecc.

241. Avvolgendo una sbarra o un ago magnetico nella limatura di ferro, questa vi resterà aderente ma in quantità diseguali nei diversi punti della superficie. Si vedrà la limatura aggrupparsi in fili lunghi e spessi verso gli estremi della sbarra più che in ogni altro punto, mentre nessun granello resterà attaccato alla sezione media. Ai punti di massima azione si è dato il nome di *poli*, e quello di *linea media* o *neutra* alla sezione che non dimostra veruna forza attrattiva. Quindi è che ponendo una lastra sopra una sbarra magnetica orizzontalmente adagiata, e percuotendola leggermente ed a colpi ripetuti dopo avervi sparsa della limatura di ferro, i granelli di questa si vedranno ordinarsi in linee curve concorrenti in due punti. Poli.

242. Un ago calamitato, mobile intorno ad un asse verticale, si dirige da sè stesso con uno dei poli verso nord e coll'altro verso sud; quindi è che i due poli magnetici si distinguono cogli aggiunti di *boreale* ed *australe*. Allontanando l'ago Forza direttrice.

dalla sua posizione di equilibrio, vi ritorna con una serie di oscillazioni più o meno celeri; e ciò dimostra che quella direzione è l'effetto di una forza, perciò denominata *forza direttrice*.

Declinazione. 243. Segnando la meridiana di un dato luogo e soprapponendovi il centro di un ago magnetico, mobile intorno ad un asse verticale, si vedrà che la congiungente i due poli dell'ago non coincide in generale con quella meridiana, ma vi forma un angolo, che varia secondo il luogo ed il tempo. Quest'angolo ha ricevuto il nome di *declinazione*; e per essa il meridiano geografico di un dato luogo va distinto dal suo *meridiano magnetico*, ossia da quel piano verticale che ivi passerebbe pei poli di un ago calamitato mobile intorno al suo centro.

Inclinazione. 244. Se si magnetizzi con uno dei metodi, che qui appresso diremo, un ago di acciaio mobile intorno ad un asse orizzontale condotto pel suo centro di gravità perpendicolarmente al meridiano magnetico, vedremo che l'ago prenderà da se stesso una direzione inclinata all'orizzonte, ed alla quale ritornerà con una serie di oscillazioni ogni volta che ne sia rimosso.

Quest'angolo si denomina *inclinazione*, ed è vario secondo il luogo ed il tempo. Esso in generale cresce colla latitudine, ma colla differenza che nell'emisfero boreale si abbassa verso il suolo il polo nord dell'ago, e nell'australe il polo sud. Intanto la *linea equatoriale magnetica*, ossia la serie di punti in cui l'ago rimane orizzontale, non coincide colla *linea equatoriale* terrestre, ma l'interseca in alcuni punti formando così una curva a doppia inflessione.

Abbiamo detto che per osservare il fenomeno dell'inclinazione è d'uopo che l'asse di rotazione dell'ago sia perpendicolare al piano del meridiano magnetico. Per attuare questa condizione si girerà intorno a se stesso il sostegno dell'ago finchè questo non divenga perfettamente verticale: è evidente che allora l'asse di rotazione dell'ago giacerà nel piano del meridiano magnetico, e che in conseguenza basterà girarlo di 90°, perchè gli divenga perpendicolare.

La forza direttrice è una coppia. 245. Facendo che un ago fortemente calamitato galleggi per mezzo di una lamina di sughero sopra una massa di acqua in

perfetta calma, si vedrà l'ago oscillare insieme al suo sostegno senza comunicargli verun moto di traslazione. Ciò dimostra che la componente orizzontale della forza direttrice è una coppia. E tale è ancora la sua componente verticale, imperocchè veruna differenza di peso si trova in un ago di acciajo prima e dopo averlo calamitato.

La forza direttrice dunque, che agisce secondo la linea di equilibrio di un ago magnetico liberamente sospeso pel suo centro di gravità, è una coppia le cui forze componenti stanno applicate ai poli dell'ago. Se ab (Fig. 239) rappresenta l'indicata linea di equilibrio, le due forze m ed n eguali ed opposte che in essa agiscono, comporranno una coppia in ogni altra posizione $a'b'$ dell'ago; e se delle due forze della coppia consideriamo le componenti $a't, b's$ normali all'asse di figura dell'ago, avremo che questo sarà spinto a tornare nel suo meridiano magnetico col momento:

$$a'b' \times a't = l\varphi \operatorname{sen} \alpha,$$

l indicando la distanza tra i poli, φ l'intensità della forza direttrice ed α l'angolo di deviamento dallo stesso meridiano. Il prodotto $l\varphi \operatorname{sen} \alpha$ si denomina *momento magnetico*.

246. Avvicinando tra loro due aghi magnetici li vedremo attrarsi pei poli eteronimi e ripellersi per gli omonimi. Queste attrazioni e ripulsioni seguono la ragione inversa dei quadrati delle distanze dai centri di azione, come il Coulomb ha messo fuor di dubbio colla sua bilancia di torcimento (Fig. 220). Egli sospese orizzontalmente al filo di argento un ago calamitato, e fatto coincidere col piano del meridiano magnetico dell'ago tanto lo zero della gradazione segnata sulla cassa che quello del micrometro superiore, introdusse nella cassa in luogo della pallina fissa una lunga verga magnetica che inferiormente e nello stesso piano orizzontale dell'ago mobile presentava a questo un polo omonimo. In una delle sue sperienze l'ago mobile, che aveva 15 pollici di lunghezza, fu respinto a 24° dall'azione ripulsiva della calamita fissa; e girando l'indice del micrometro per 3 circonferenze e poi per al- Attrazione e ripulsione magnetica.

tre 5, l'ago passò successivamente a 17° ed a 12°. Or la calamita fissa per deviare l'ago di queste quantità di gradi, ha dovuto vincere il suo momento magnetico e la resistenza del filo al torcimento. Con esperienze preliminari Coulomb aveva trovato che per allontanare quell'ago di 1° dal suo meridiano, bisognava dare al filo di argento 35° di torcimento; quindi chiamando m, m', m'' i momenti magnetici corrispondenti alle deviazioni 24°, 17°, 12°, si aveva:

$$m = \frac{35°.\text{sen}24°}{\text{sen}1°} = 815° \text{ di torcimento}$$

$$m' = \frac{35°.\text{sen}17°}{\text{sen}1°} = 586° \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$m'' = \frac{35°.\text{sen}12°}{\text{sen}1°} = 417° \quad \text{»} \quad \text{»}$$

A questi momenti bisognava aggiungere i gradi di torcimento patito dal filo, che furono di 24° per la 1ª posizione dell'ago, di 3. 360° + 17° per la 2ª, e di 8. 360° + 12° per la 3ª. Quindi le componenti della forza ripulsiva, normali alla direzione dell'ago, equilibrarono:

per 24° di deviamento . . . . $815° + 24° = 839°$ di torcimento
per 17° » » $586° + 3.360° + 17° = 1683°$ » »
per 12° » » $417° + 8.360° + 12° = 3309°$ » »

E dividendo queste componenti pel coseno della metà del rispettivo angolo di deviamento si avevano i corrispondenti valori delle risultanti:

$$\varphi = \frac{839°}{\cos 12°} = 858°, \; \varphi' = \frac{1683°}{\cos.8°,30'} = 1702°, \; \varphi'' = \frac{3309°}{\cos 6°} = 3327°.$$

Rimaneva a comparare queste forze ripulsive alle distanze del polo dell'ago da quello della calamita fissa, ossia alle corde c, c', c'' degli archi di 24°, 17°, 12°. Ponendo = 100000 la distanza del filo di sospensione dalla calamita verticale, si ha:

$$c = 2.\text{sen}12° . \; 100000 = 41582$$
$$c' = 2.\text{sen}8°,30'.100000 = 29562$$
$$c'' = 2.\text{sen}6° . \; 100000 = 20906.$$

Or tra i limiti di errore dell'esperimento i rapporti delle forze ripulsive:

$$\frac{1702}{858}=1,98\ ,\ \frac{3327}{1702}=1,95$$

risultano eguali agl'inversi dei quadrati delle distanze:

$$\frac{41582^2}{29562^2}=1,98\ ,\ \frac{29562^2}{20906^2}=1,99.$$

Questa legge delle distanze è stata verificata da Coulomb anche col metodo delle oscillazioni. Egli sospese a fili di seta non torta dei piccoli aghi magnetici, e li fece oscillare sotto la sola influenza terrestre, e poi in presenza di uno dei poli di una lunga calamita verticale ed in due distanze diverse. Chiamando n, n', n'' i numeri di oscillazioni fatte in tempi eguali, e $\varphi, \varphi', \varphi''$ le corrispondenti forze magnetiche, si aveva (nº 51):

$$n^2 : n'^2 : n''^2 = \varphi : \varphi' : \varphi'',$$

donde: $\varphi'-\varphi : \varphi''-\varphi = n'^2-n^2 : n''^2-n^2.$

Ma $\varphi'-\varphi$ e $\varphi''-\varphi$ rappresentano le intensità di attrazione della calamita, dunque queste intensità erano proporzionali a n'^2-n^2 ed n''^2-n^2.

In una delle sue sperienze Coulomb dopo aver trovato che l'ago per solo effetto della forza direttrice faceva 15 oscillazioni a minuto, lo fece successivamente oscillare ad 8 ed a 4 pollici di distanza dal polo inferiore di un lungo filo di acciaio calamitato, ed ebbe 41 oscillazioni a minuto per la prima distanza, e 24 per la seconda. Ponendo questi numeri nell'ultima proporzione, si ha:

$$\frac{\varphi'-\varphi}{\varphi''-\varphi}=\frac{24^2-15^2}{41^2-15^2}=\frac{1}{4}.$$

Una distanza doppia aveva dunque resa la forza attrattiva quattro volte minore.

247. L'attrazione e ripulsione magnetica seguono la ragione inversa dei quadrati delle distanze, quando i poli della calamita agiscono isolatamente; e perciò le sperienze di Coulomb Azione delle calamite in distanza.

furono istituite in modo da rendere trascurabile l'azione del polo opposto a quello che si adoperava come centro di attrazione o ripulsione. Ma quando i due poli agiscono contemporaneamente, l'azione risultante decresce assai più che nella ragione dei quadrati. Gauss ha dato delle formole per calcolare in ogni caso l'azione di una calamita in distanza; noi ci limiteremo ai due casi più importanti.

— 1° Ponendo che la calamita NS (Fig. 232) orizzontalmente situata, sia incontrata nel suo punto medio e ad angolo retto dalla linea di direzione dell'ago magnetico *ns* mobile intorno al suo centro di equilibrio, facciamoci a determinare l'azione della calamita sul polo *s* dell'ago — Essendo questo polo egualmente distante dai poli N ed S della calamita, l'attrazione dell'uno e la ripulsione dell'altro potranno esser rappresentate dalle due rette eguali *sp*,*st*; sulle quali componendo il parallelogrammo *pstv*, avremo l'azione risultante della calamita NS sul polo *s* dell'ago espressa dalla diagonale *sv*. Or se facciamo la lunghezza NS della calamita $=2l$, la distanza $Ns=Ss=r$, la risultante $sv=f$, e chiamiamo q l'azione di ciascuno dei due poli N ed S per l'unità di distanza, sarà $st=sp=\frac{q}{r^2}$; ed i due triangoli simili *vps*, NsS ci daranno la proporzione:

$$f:\frac{q}{r^2}=2l:r;$$

donde:
$$f=\frac{2ql}{r^3}\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;(1)$$

È dunque l'azione totale della calamita sul polo *s* dell'ago inversamente proporzionale alla 3ª potenza della distanza Ss; e se questa sia tale da potersi riguardare eguale alla distanza *sm* del polo *s* dell'ago dalla calamita, diremo che l'azione totale seguirà la ragione inversa del cubo di questa distanza.

— 2° Supponiamo che la congiungente NS (Fig. 233) i due poli della calamita orizzontalmente situata vada ad incontrare nel punto medio e ad angolo retto la congiungente *ns* i due poli

dell'ago che supponiamo mobile intorno al suo centro. Ponendo la distanza $ms = r$ e la lunghezza NS della calamita $= 2l$, sarà prossimamente la distanza $Ss = r - l$, e l'altra $Ns = r + l$; quindi chiamando q l'azione di ciascun polo per l'unità di distanza, avremo che l'azione ripulsiva del polo S della calamita sull'omonimo polo s sarà $\frac{q}{(r-l)^2}$, e l'attrazione che vi esercita N sarà $\frac{q}{(r+l)^2}$; e poichè queste due forze si possono riguardare come agenti nella stessa linea, si ha che l'azione totale F della calamita sull'ago sarà espressa dall'equazione:

$$F = q\left[\frac{1}{(r-l)^2} - \frac{1}{(r+l)^2}\right] = q[(r-l)^{-2} - (r+l)^{-2}]$$

$$= q\left[\frac{4l}{r^3} + \frac{8l^3}{r^5} + \ldots\right] \ldots\ldots\ldots (2)$$

E se la distanza r sia abbastanza grande, perchè si possano trascurare i termini che hanno per denominatori potenze di r superiori alla 3ª, potremo stabilire:

$$F = \frac{4ql}{r^3};$$

vale a dire che anche in questo caso l'azione totale decrescerà come i cubi delle distanze.

Gauss ha verificato questi risultamenti col suo *magnetometro*; indi Weber ha mostrato come si possa giungere allo stesso scopo mercè di una semplice bussola ch'egli fermava nel mezzo di una riga (Fig. 226 e 234) lunga 1 metro e divisa in decimetri. Situando la riga parallelamente al meridiano magnetico (Fig. 226) e la calamita come indica NS egli riproduceva il caso della fig. 232; ed otteneva poi quello della fig. 233, quando la riga messa ad angolo retto col meridiano magnetico (Fig. 234), la calamita si trovava disposta come indica NS.

Allorchè in questo apparecchio di Weber l'ago della bussola è deviato per l'azione della calamita di un certo angolo v, la forza direttrice f della terra lo spinge a ritornare col momento

$2lf\,\mathrm{sen}\,v$ (n° 243), mentre la forza F della calamita tende ad allontanarlo col momento $2lF\cos v$. Nell'equilibrio dell'ago si avrà dunque:

$$F\cos v = f\,\mathrm{sen}\,v\,,$$

donde: $$F = f\,\mathrm{tg}\,v.$$

Vale a dire che la forza deviante F della calamita è proporzionale alla tangente dell'angolo di deviamento dell'ago. Potremo dunque assumere questa tangente come misura di F; e ponendo all'uopo il 2° membro dell'equ. 2 sotto la forma: $\frac{x}{r^3}+\frac{y}{r^5}+\ldots$, avremo:

$$\mathrm{tg}\,v = \frac{x}{r^3}+\frac{y}{r^5}+\ldots$$

Quindi l'equazione:

$$r^3\,\mathrm{tg}\,v = x+\frac{y}{r^2}+\ldots$$

dalla quale risulta che il prodotto $r^3\mathrm{tg}\,v$ si approssima ad un certo valore x, a misura che r diviene più grande; o che divengono minori le lunghezze dell'ago e della calamita perturbatrice. Dai risultamenti ch'ebbe colla riga qui sopra indicata, Weber ha dedotto che la calamita da lui adoperata dava per $r^3\mathrm{tg}\,v$ il valore limite 0,01753 quando sperimentava a modo della fig. 233, ed il valore 0,00876 quando agiva riproducendo la fig. 232.

Misura del magnetismo terrestre. 248. È noto che un ago magnetico mobile intorno ad un asse verticale, prende da se stesso una direzione stabile, alla quale ritorna con una serie di oscillazioni, ogni volta che n'è rimosso. Ciò dimostra che l'ago è ritenuto nel suo meridiano da forze attrattive, le quali poi si trasformano in ripulsive quando l'ago viene girato per 180°, imperocchè lo si osserva rifuggire da una tale posizione qualora vi sia meccanicamente condotto. Comparando questi fatti all'attrazione dei poli eteronimi delle calamite ed alla ripulsione dei loro poli omonimi,

si è dovuto conchiudere che il nostro globo è un'immensa calamita, la quale ha il suo polo australe nella regione settentrionale del meridiano magnetico ed il suo polo boreale nella regione meridionale dello stesso meridiano.

Or se un ago di forza magnetica costante fosse trasportato in diversi punti del globo ed ivi si prendesse nota delle quantità di oscillazioni fatte in tempi eguali e delle corrispondenti inclinazioni magnetiche, si avrebbero tutti gli elementi necessarii per definire le intensità del magnetismo terrestre in tutti quei punti di osservazione. E per fermo chiamando n_1, n_2, n_3, ecc. le quantità di oscillazioni fatte dall'ago in tempi eguali, ed i_1, i_2, i_3, ecc. le corrispondenti inclinazioni magnetiche, avremo i rapporti delle componenti orizzontali φ_1, φ_2, φ_3, ecc. del magnetismo terrestre in quei luoghi dalle proporzioni (n° 51):

$$\varphi_1 : \varphi_2 : \varphi_3 : \ldots = n_1^2 : n_2^2 : n_3^2 : \ldots$$

e quelli delle risultanti f_1, f_2, f_3, ecc. dalle relazioni dei quozienti (n° 21) $\frac{\varphi_1}{\cos i_1}$, $\frac{\varphi_2}{\cos i_2}$, $\frac{\varphi_3}{\cos i_3}$, ecc.

Con questo metodo, dovuto a Borda, Humboldt ha fatte varie determinazioni di magnetismo terrestre nei suoi viaggi per l'Europa e l'America: altri viaggiatori ne han fatte ancora, e dall'insieme di tutte le osservazioni si è rilevato che il magnetismo terrestre è minimo nel suo equatore e che di là va crescendo verso il nord ed il sud in modo che prossimamente ai poli magnetici della terra la sua energia è 1,5 di quella che ha luogo nell'omonimo equatore. E non altrimenti che la declinazione ed inclinazione l'intensità magnetica della terra si è mostrata sottoposta a variazioni diurne ed annue.

È d'uopo intanto osservare che il metodo di Borda suppone necessariamente la possibilità di assicurarsi che l'ago nel tempo decorso tra due osservazioni abbia conservata costante la sua forza magnetica. E poichè questa non può dedursi che dalla intensità della sua forza direttrice, la quale è proporzio-

nale al prodotto del magnetismo dell'ago per quello della terra, è chiaro che il metodo di Borda è insufficiente all'uopo, e che per ottenere esattamente la misura del magnetismo terrestre bisognava escogitare un mezzo che fosse indipendente dalla forza dell'ago adoperato. L'invenzione di questo mezzo è una stupenda scoverta di Gauss, e la sua opera — INTENSITAS VIS MAGNETICAE TERRESTRIS AD MENSURAM ABSOLUTAM REVOCATA — forma epoca nella storia del Magnetismo.

Per dare un'idea del metodo di Gauss, nel modo che si addice ad un libro elementare, ritorniamo alla formola (n° 48):

$$t=\pi\sqrt{\frac{K}{Hg}},$$

nella quale t rappresenta la durata di oscillazione di un pendolo composto, di cui K indica il momento d'inerzia rispetto all'asse di sospensione ed H il momento statico. Dando all'ago, con cui vuolsi misurare l'intensità del magnetismo terrestre, la forma di una verga parallelepipeda, si calcolerà facilmente il valore di K; e potendosi daltronde dedurre il valore di t dal numero di oscillazioni fatte dall'ago in un dato tempo, l'equazione precedente ci darà il momento statico:

$$H=\frac{\pi^2 K}{t^2 g}.$$

Ma il momento statico dell'ago essendo un effetto della sua forza direttrice, la quale viene espressa dal prodotto del suo magnetismo M pel magnetismo T della terra, avremo:

$$MT=\frac{\pi^2 K}{t^2 g}.$$

Daltronde la direzione, che un ago magnetico ns (Fig. 233) prende per l'azione della terra, può considerarsi come dovuta all'azione di una calamita N'S' che tendesse a mantenerlo ad essa parallelo; e chiamando T il magnetismo di questa calamita, equivalente a quello della terra, ed m il magnetismo dell'ago ns, questo avrà una forza direttrice rappresentata dal

prodotto mT. Or se all'ago ns si presenti nello stesso suo piano orizzontale e perpendicolarmente al suo meridiano magnetico la stessa calamita NS, di cui abbiamo trovato il momento statico $\frac{\pi^2 K}{t^2 g}$, l'ago sotto l'azione della forza mM che riceve dalla calamita sarà deviato di un certo angolo v ed avremo (n° 247):

$$\frac{mM}{mT}=\frac{M}{T}=\text{tg}\, v.$$

Eliminando M tra quest'equazione e la precedente, risulta:

$$T=\frac{\pi}{t}\sqrt{\frac{K}{g.\text{tg}\, v}},$$

qualunque sia il magnetismo M dell'ago.

Questa formola dà la semplice componente orizzontale del magnetismo terrestre. La sua risultante si avrà poi dall'espressione $\frac{T}{\cos i}$, dopo aver definita l'inclinazione magnetica i.

249. Col metodo esposto nel n° precedente non si ha che il valore medio del magnetismo terrestre pel tempo che han durato gli sperimenti. Ma se nella durata di quel tempo il magnetismo della terra fosse variato, non si sarebbe potuto rilevare da quegli sperimenti. A questo bisogno della scienza Gauss ha soddisfatto col suo *magnetometro bifilare*. Misura delle variazioni diurne.

È noto che un corpo sospeso ai due capi di un filo condotto per la gola di una carrucola, richiede pel suo equilibrio che quei due capi stiano in un medesimo piano verticale, e che se il corpo si facesse girare intorno ad un asse condotto pel suo centro di gravità, il sistema dei due fili verrebbe a patire un torcimento pel quale il corpo sarebbe spinto a tornare nella posizione di equilibrio.

Su questo semplicissimo principio è costruito il *magnetometro bifilare* di Gauss. Per la gola di una girella fissata in alto passa un filo (Fig. 225) il quale nei capi estremi tiene sospesa una staffa in cui si adagia la verga calamitata. E la so-

spensione è fatta in modo che la verga tendendo a mettersi nel meridiano magnetico ed il sistema dei fili opponendovisi, risulti tale equilibrio tra queste due contrarie tendenze da farla rimanere presso che perpendicolare a quel meridiano. Così il momento magnetico della verga risulta quasi che massimo, e basterà una piccola variazione nell'intensità del magnetismo terrestre per far variare sensibilmente la posizione del suo equilibrio; le cui variazioni si hanno facilmente in gradi e minuti per opera di uno specchio piano fermato alla staffa e che riflette in un cannocchiale l'immagine di una riga graduata.

La polarità magnetica è molecolare.

250. È noto che in una verga regolarmente calamitata la forza magnetica è nulla nella linea media, perciò denominata *neutra*, e che di là va crescendo verso gli estremi fino ai poli che sono i punti di massima azione; e che questa forza così ripartita quanto all'intensità, ha diverso modo di agire nelle due metà della verga, contraddistinto in una metà col nome di *magnetismo boreale*, e di *magnetismo australe* nell'altra. Dimodochè stando alla superficie per così dire del fatto sembra che il magnetismo sia ordinato in modo da esservi solo magnetismo boreale in una metà della verga calamitata, e solo magnetismo australe nell'altra.

Intanto se la verga calamitata si divida per metà, non si avranno due verghe, l'una dotata di solo magnetismo boreale, e l'altra di solo australe, ma si avranno in vece due calamite complete, essendo sorti nella regione prima occupata dalla linea neutra, un polo boreale per la metà che mostrava solo magnetismo australe, ed un polo australe per la metà in cui si vedeva solo magnetismo boreale. Continuando la suddivisione della verga in due, si vedranno sorgere tante nuove coppie di poli quante sezioni si faranno; e perciò siamo costretti a riguardare la ripartizione magnetica osservata nell'intera verga come risultante delle polarità magnetiche delle sue molecole, ordinate in modo d'avere i loro poli boreali tutti verso il polo boreale dell'intera verga e gli australi dal lato opposto. Così i poli eteronimi di due molecole consecutive nella lunghezza della verga, saranno in presenza l'uno dell'altro; e ciò che di

magnetismo libero si manifesterà in una sezione normale a quella lunghezza, non è che la differenza delle molecolari polarità eteronime che ivi si trovano.

E che queste polarità debbano essere in certo modo ordinate perchè la verga risultasse magnetizzata, ne abbiamo pruova da un semplicissimo sperimento. Prendasi una scatoletta di legno che abbia forma di verga, si faccia piena di limatura di ferro, e si sottoponga a quella stessa operazione che vale a calamitare una verga di acciajo; la scatola riuscirà realmente magnetizzata. Indi si tolga la limatura, si rimescoli ben bene, e poi si riponga nella scatola: in questa si troverà sparita ogni traccia di polarità magnetica, e ciò pel solo fatto di un nuovo ordinamento nelle particelle della limatura.

E non solamente per la produzione del magnetismo di un corpo si richiede che le sue polarità molecolari sieno ordinate, ma le molecole stesse del corpo vogliono speciale disposizione. I fatti che più chiaramente accennino a questo concetto, ci saranno offerti da alcuni fenomeni d'induzione elettro-magnetica che in seguito esporremo; per ora ci limitiamo alle seguenti osservazioni.

— 1ª Il ferro dolce, il cui equilibrio molecolare è così poco stabile, con eguale facilità acquista e perde la polarità magnetica, mentre l'acciajo prende un magnetismo tanto più forte e più durevole, per quanto è più alto il grado della sua tempera, ossia per quanto più stabile è il suo equilibrio molecolare.

— 2ª Fusinieri tenendo fermo un ago calamitato tra i poli di una vigorosa calamita, ed in modo che fossero prossimi i poli omonimi, vide prodursi nell'ago un tremore sensibile, il quale come ebbe fine, lasciò l'ago coi poli invertiti.

— 3ª Il calore, che altera il sistema molecolare di un corpo allontanandone le particelle ed ingenerandovi forse una speciale vibrazione, diminuisce la forza polare di una calamita a misura che n'eleva la temperatura. L'urto, la flessione, una scarica elettrica nel senso della lunghezza dell'ago, che sono cagioni perturbatrici dell'equilibrio molecolare, sono ancora

altrettanti mezzi smagnetizzanti e talvolta produttori d'inversione polare. La storia dei viaggi marittimi annovera molti casi, in cui per effetto di scariche elettriche atmosferiche gli aghi delle bussole perdettero la loro normale polarità magnetica; e la scienza nautica oggi deve ad un marino italiano [1] la bella idea della *bussola verificatrice*, per mezzo della quale a bordo di un legno si può subito conoscere se l'ago della sua bussola abbia normale magnetismo, e nel caso che lo avesse perduto, restituirglielo.

Distribuzione del magnetismo in una verga calamitata.

251. Nel n° 241 abbiamo detto che la limatura di ferro aderendo in diversa quantità ai varii punti della superficie di una verga magnetica, fa conoscere come il magnetismo vi sia inegualmente distribuito. Ora il modo di questa distribuzione è stato determinato da Coulomb col seguente metodo. Ad un filo di seta non torta egli sospendeva orizzontalmente un piccolo ago magnetico e lo presentava a diverse sezioni di una lunga verga calamitata AB (Fig. 240) verticalmente situata. Dopo aver numerate le oscillazioni che l'ago faceva in un dato tempo per effetto della sola forza direttrice, egli contava quelle che l'ago in egual tempo eseguiva in presenza della calamita; e denominando n il primo numero ed n' il secondo, la forza magnetica della verga per la falda giacente nello stesso piano orizzontale dell'ago, risultava proporzionale ad $n'^2 - n^2$. Facendo delle consimili determinazioni per diverse sezioni orizzontali della verga, ebbe valori analoghi ad $n''^2 - n^2$; e considerando questi valori come ordinate di una curva che aveva per asse delle ascisse la lunghezza della verga, egli ha potuto graficamente definire la *curva delle intensità magnetiche* e quindi conoscere — 1° Che in una verga regolarmente magnetizzata, la curva delle intensità l'è tangente nel luogo della sua linea media, stante che in quella sezione l'ago fa quel numero di oscillazioni che corrisponde all'azione della sola forza direttrice — 2° Che partendo dalla linea media la curva delle intensità

[1] Il Sig. E. Rodriquez, Capitano di Vascello della Marina Italiana. Veggasi la sua dotta Memoria — DESCRIZIONE ED USO DELLA BUSSOLA VERIFICATRICE ELETTROMAGNETICA.

va tangente per una certa estensione colla superficie della verga, indi se ne stacca e si eleva rapidamente verso gli estremi, ove presenta le massime ordinate — 3° Che i due rami della curva sono simmetrici rispetto alla normale elevata dal punto d'intersezione del suo piano colla linea media; la qual cosa dimostra che le intensità magnetiche delle due metà della verga sono eguali.

Quando l'ago magnetico ha la forma di un prisma assai sottile, la curva delle intensità rimane costante per qualunque lunghezza dell'ago, purchè non sia minore di 6 ad 8 pollici; in conseguenza i poli avranno in tal caso sempre la stessa energia e disteranno dalle estremità dell' ago di una quantità costante che Coulomb trovò eguale a 18 linee. Se poi la lunghezza dell'ago sia minore di 6 pollici, i poli si allontaneranno dagli estremi di circa 0,1 della lunghezza totale, e tanto più si approssimeranno a questo limite per quanto l'ago sarà più corto.

Or passiamo a vedere, seguendo le orme di Van Ress, come questi risultamenti ottenuti da Coulomb possano conciliarsi coll' idea di una polarità molecolare, quale risulta dai fatti esposti nel n° precedente. Immaginiamo (Fig. 138, I) una delle serie di molecole che in una verga regolarmente calamitata si trovano sopra una retta parallela al suo asse di lunghezza, aventi tutte i loro poli boreali girati verso il polo omonimo B della verga, e gli australi dal lato opposto. Se le polarità fossero di eguali energie in tutta la serie di molecole, allora si avrebbe $b_1 = a_2$, $b_2 = a_3, \ldots . a' = b''$, $a'' = b'''$, ...; e queste azioni magnetiche eguali ed opposte dei poli prossimi darebbero una risultante nulla sopra ogni punto giacente fuori della calamita. La verga non avrebbe dunque magnetismo libero che nelle sole estremità, e sarebbe neutra in tutta la sua lunghezza; e poichè ciò ripugna ai risultamenti di Coulomb, è chiaro che le energie magnetiche molecolari non si possono supporre eguali.

Dovendo esser diseguali, poniamo che formino due serie crescenti dal mezzo della verga verso gli estremi di essa. A-

vremmo allora $b_1 > a_2, b_2 > a_3 \ldots a' > b'', a'' > b''', \ldots$; e la verga mostrerebbe magnetismo boreale in una delle sue metà con un polo australe in fine, e magnetismo australe nell'altra con un polo boreale estremo. È inutile il dire che questa seconda ipotesi è in aperta contraddizione col fatto.

Poniamo in fine che la polarità molecolare sia massima nel mezzo della verga e di là vada decrescendo verso gli estremi. Sarà in conseguenza $a_2 > b_1, a_1 > b_2, \ldots b'' > a', b''' > a'', \ldots$; e quindi si avrà magnetismo libero australe nella metà della verga in cui giace il suo omonimo, e magnetismo libero boreale nell'altra. Abbiamo così un'ipotesi che nei suoi risultamenti è conforme al fatto; e poichè è la sola possibile, fa d'uopo conchiudere che realmente l'energia delle polarità molecolari vada crescendo dagli estremi al mezzo di una verga regolarmente calamitata. Al che si aggiunga che ordinando l'uno appresso all'altro più pezzi parallelepipedi di acciaio, e magnetizzandoli insieme come se facessero una verga sola, realmente si trova che mentre il loro sistema forma una sola calamita coi due poli e la sua linea media, i pezzi che stanno nel mezzo risultano più fortemente calamitati di quelli situati verso gli estremi.

Laonde se questo ordinamento nell'energia delle polarità molecolari voglia rappresentarsi per mezzo di rette ad esse proporzionali, elevate perpendicolarmente alla lunghezza di una verga regolarmente calamitata, le sommità delle perpendicolari dovranno trovarsi sopra una curva (Fig. 138, II) concava verso la verga e simmetrica rispetto alla perpendicolare elevata dalla sua linea neutra.

Ma se il magnetismo della verga non fosse stato regolarmente svolto, allora la curva delle intensità molecolari potrebbe presentare dei punti d'inflessione. Poniamo, a modo di esempio, che la curva offrisse un massimo in *mn* (Fig. 138, III) ed un minimo in *pq*, sarebbero questi i luoghi di due linee neutre, imperocchè il magnetismo libero, ossia la differenza polare delle molecole consecutive, dopo esser stata boreale per la lunghezza *nq*, dovrà essere australe per la lunghezza *qr*;

quindi la verga presenterà due poli australi, A ed A', negli estremi ed un polo boreale B nel mezzo. E se la curva presentasse due massimi, *mn* e *pq* (Fig. 138, IV) con un minimo *st* nel mezzo, allora seguendo lo stesso principio, si avrebbero in *n*, *t* e *q* altrettante linee neutre, i poli A e B negli estremi della verga, ed i poli B' ed A' nel mezzo.

Questi poli soprannumerarii, che per difetto nel metodo di calamitare talvolta si producono in una verga di acciaio e che sono conosciuti sotto il nome di *punti conseguenti*, non sono dunque necessaria conseguenza d'inversione nell'ordinamento delle polarità molecolari, ma possono ancora risultare da sola perturbazione di quantità nel magnetismo delle molecole.

252. La forza magnetica può esser eccitata nei corpi, che ne son capaci, per mezzo di un'azione induttrice, avvalorata specialmente dall'azione meccanica dello strofinio. Così una verga di ferro, tenuta prossimamente o meglio a contatto dei poli di una calamita, risulta magnetizzata; ed avvicinandola all'ago di una bussola si troverà che i suoi poli sono opposti a quelli della calamita inducente. E l'azione induttrice è reciproca tra i due corpi, imperocchè le *armature*, che sono dei pezzi di ferro dolce messi a contatto dei poli di una calamita, hanno la proprietà di accrescerne la forza, come per la prima volta è stato osservato da Galilei, a cui è dovuta la pratica di armare le calamite. Donde poi si rileva la ragione di un fatto osservato per la prima volta e con ammirazione da Réaumur: una calamita, che appena poteva sostenere un pezzo di ferro, lo sollevò facilmente, quando fu messo sopra un'incudine. Induzione magnetica

Fra tutti i corpi il ferro dolce è quello che meglio riceve l'azione induttrice di una calamita, e più celeramente perde il magnetismo che ne ha ricevuto. Al contrario l'acciaio temperato, che resiste all'induzione magnetica, ne conserva l'effetto; e questa sua proprietà si è voluta attribuire ad una forza che si è immaginata nelle sue molecole, e che si è denominata *forza coercitiva*.

Il fatto dell'induzione ci fa poi comprendere perchè una calamita attrae soltanto i corpi che sono capaci di divenir

magnetici; e perchè un primo corpo attratto ne può tirare un secondo, questo un terzo, ecc. formandosi così una catena più o meno lunga secondo l'energia della calamità inducente, e la facilità a magnetizzarsi dei corpi esposti alla sua azione.

Anche il magnetismo terrestre agisce per induzione su i corpi capaci di riceverla. Una verga di ferro dolce, situata parallelamente all'ago d'inclinazione, acquista immediatamente i due poli magnetici, il boreale in basso e l'australe in alto; e se si capovolga, i due poli resteranno invertiti. Analoghi effetti ne riceve l'acciaio temperato, ma sono più lenti a prodursi, e più durevoli dopo esser stato rimosso dalla prima posizione.

Per l'azione induttrice della terra è avvenuto che delle verghe di ferro si siano calamitate ed abbiano prese un magnetismo permanente per mezzo dell'ossidazione che ha tolto ad esse i caratteri del ferro dolce. Nel 1590 un chirurgo di Rimini osservava per la prima volta che una verga di ferro, rinvenuta in un muro, era calamitata; e nel 1630 Gassendi faceva la stessa osservazione sull'asta di ferro che aveva sostenuta la croce del campanile di S. Giovanni di Aix.

Secondo le osservazioni di Barlow tutte le bombe e palle di cannone sono calamitate dall'azione della terra: i loro poli stanno sul diametro parallelo all'asse d'inclinazione, ed il loro magnetismo, nullo su tutta la circonferenza del cerchio massimo perpendicolare a quel diametro, va poi crescendo fino alla distanza di 90°.

Compensatore di Barlow. 253. I pezzi di ferro adoperati nella costruzione di una nave, e le masse dello stesso metallo che fanno parte dell'armamento, ricevono dall'induzione terrestre una polarità magnetica che varia secondo la diversa loro giacitura rispetto al meridiano magnetico; e poichè rispetto a questo meridiano le loro posizioni sono fatte continuamente varie dal moto stesso della nave, così si comprende come debba essere anche variabile la loro influenza a perturbare la direzione dell'ago della bussola. La Nautica deve a Barlow l'invenzione di un metodo che permet-

te valutare con sufficiente esattezza l'errore così prodotto nella naturale declinazione dell'ago magnetico. Immaginiamo che la nave stia ferma in una rada, e che due osservatori stiano l'uno presso la bussola della nave, l'altro presso un simile strumento situato in un punto della riva donde sia facile vedere la nave in tutte le posizioni che potrà prendere girando su sè stessa. All'apparire di un segno convenuto i due osservatori si guarderanno a vicenda per mezzo dei loro cannocchiali, e misureranno gli angoli che gli assi dei loro strumenti faranno cogli aghi delle rispettive bussole: la differenza di questi angoli, che sarebbero stati eguali se il ferro della nave non avesse alterato il parallelismo degli aghi, darà la misura di questa forza perturbatrice. Si ripeta la stessa operazione per ogni 10 gradi del giro della nave sopra se stessa, e si prenda nota delle differenze osservate negli angoli. Indi si tolga la bussola dalla nave, e si ponga nel luogo che l'altra occupava sulla riva, adagiandola sopra una cassa di legno (Fig. 243) mobile intorno ad un asse verticale. Sopra un lato della cassa sieno scolpiti diversi fori in cui possa entrare un cilindro di rame doppio abbastanza per sostenere un disco di ferro di 12 a 13 pollici di diametro. Per mezzo di questo apparecchio, denominato *compensatore*; si cercherà produrre nella bussola trasportata sulla riva quella stessa serie di deviamenti, che si saranno osservati stando a bordo della nave; dopo di che si restituirà la bussola al suo posto con tutto il suo sostegno, a cui si apporrà il compensatore in modo che sia rispetto all'ago in quella medesima posizione che sulla riva si sarà trovata buona a riprodurre le alterazioni recatevi dal ferro della nave. Così il compensatore aggiungerà alla prima azione un'altra eguale, e con ciò darà agio a valutarne l'influenza. Ed in vero, poniamo che senza il compensatore l'ago devii di 20° all'ovest, e che questa declinazione salga a 23° per mezzo del compensatore; poichè questo raddoppia l'effetto dovuto all'azione del ferro della nave, la vera posizione dell'ago dovrà essere di 23°—2.3°=17°. Se il compensatore in vece di accrescere la declinazione dell'ago, l'avesse fatta scendere a 18°, al-

lora la vera posizione dell'ago sarebbe stata di $18°+2.2°=22°$.

L'induzione terrestre sul ferro delle navi fa che sia turbato ancora l'andamento dei cronometri; ma contro quest'azione perturbatrice non avvi a far di meglio che situare i misuratori del tempo per quanto si può più lontani dalle masse di ferro.

Metodi per calamitare.

254. Per eccitare il magnetismo in un corpo capace di concepirlo, non evvi altro mezzo che l'induzione di una calamita, o quella che può operarvi una corrente elettrica e di cui parleremo in uno dei seguenti Capi. Stando alla prima specie d'induzione, i metodi di calamitare si riducono a quei modi di strofinio che l'esperienza per date dimensioni del corpo da magnetizzarsi ha dichiarato più efficaci ad accrescere la forza dell'induzione. Così per piccoli aghi da calamitarsi basterà che siano strofinati sul polo di una calamita per tutta la loro lunghezza e sempre nello stesso verso, or per una faccia ed or per l'altra.

Trattandosi di verghette di acciajo di maggiori dimensione, questo metodo denominato *strofinio semplice* perchè vi opera un solo polo magnetico, non sarebbe di massimo effetto. Gioverà che allora si adoperi il metodo di Knigt, che dicesi *strofinio doppio*, e che si attua nel seguente modo. Sulla parte media della verga da calamitarsi si poggeranno normalmente due vigorose calamite coi loro poli opposti; di là strofinando si porteranno, una per parte, verso gli estremi della verga; indi si riporranno nel mezzo, e si ripeterà lo strofinio allo stesso modo per più volte di seguito. Così la verga acquisterà un forte e regolare magnetismo; e se durante lo strofinio la si tenga poggiata per gli estremi su due lamine di ferro, l'effetto sarà migliore.

Un terzo modo di strofinio è quello di Mitschell perfezionato da Epino e che vuol essere adoperato ogni volta che si tratti di calamitare delle grandi verghe di acciaio. Bisognano all'uopo quattro vigorose sbarre magnetiche; su due di esse poste per lungo e coi poli opposti in prospetto, si poggerà la verga da calamitarsi; le altre due, dopo averle fermate in modo pei loro poli eteronimi che ciascuna dal canto suo risulti incli-

nata di circa 20° al piano della verga, così unite si faranno scorrere su tutta la sua lunghezza e da un estremo all'altro con movimento alternato.

255. Con qualunque metodo una verga si magnetizzi, la si dirà pervenuta al suo *punto di saturazione*, se continuando nel medesimo processo, la sua forza magnetica più non si accresce. Questo punto dipende e dalla forza della calamita magnetizzante e dalla natura del corpo magnetizzato, imperocchè si osserva corrispondere ad un grado di forza magnetica maggiore o minore, secondochè la calamita adoperata è più o meno forte, e più o meno energica è la tempera della verga magnetizzata. E la dipendenza del punto di saturazione dalla forza della calamita magnetizzante è tale che strofinando una verga magnetizzata con una calamita più debole di quella che ha servito a magnetizzarla, la sua forza decresce. Punto di saturazione.

Nelle calamite, o *fasci magnetici*, composte di più verghe fatte a guisa di ferro di cavallo (Fig. 242) il punto di saturazione può di molto elevarsi per mezzo dell'*ancora*, pezzo di ferro dolce lasciato a contatto delle due estremità della calamita, e che per mezzo di un uncinetto tiene sospesa una secchia di ottone, il cui peso si può accrescere di giorno in giorno col deporvi delle palline di piombo. Così la forza della calamita andrà crescendo secondo il peso che l'ancora può sostenere senza staccarsi. E quanto ai fasci rettilinei (Fig. 241) l'ancora non è che un'appendice scavata di ferro dolce, in cui entrano le estremità delle verghe; ma che non potendosi gravare di peso fa l' ufficio di semplice armatura, destinata a conservare la forza magnetica delle verghe.

Staccando e riattaccando più volte di seguito l'ancora alla calamita, questa perde continuamente di forza. Quelle però costruite da Häcker a Norimberga, e che vanno tra le più forti calamite conosciute, hanno la proprietà di conservare un residuo di forza costante, anche dopo che l'attacco e distacco dell'ancora si è fatto più volte.

256. Per uno stesso grado di tempera e per una medesima calamita magnetizzante le verghe più grandi acquistano mag- Dipendenza della forza magnetica

dal peso della calamita. gior forza magnetica, ma non così energica da seguire la ragion semplice del peso. Chiamando F la forza attrattiva che a dati eguali acquista una verga di peso P, Häcker ha trovato esistere la relazione:

$$F = a\sqrt[3]{P^2},$$

nella quale a è un coefficiente costante, che dipende dal punto di saturazione e dall' unità di peso scelta per la misura di F e P.

Lo stesso Häcker ha trovata ancora tra la durata T di oscillazione di una verga magnetica rettilinea, il suo peso P° e la sua lunghezza L la relazione:

$$T = c\sqrt[3]{P}.\sqrt[6]{L},$$

in cui c rappresenta un fattore costante dipendente ancora dal punto di saturazione e dalle unità di misura di P ed L.

Possono tutti i corpi divenir calamite? 257. Coulomb sospendendo degli aghi di diverse sostanze tra i poli opposti di due vigorosi fasci magnetici, aveva dedotto dalla celerità delle loro oscillazioni che il magnetismo agisce su tutti i corpi non altrimenti che sul ferro, e che la differenza è puramente di quantità. Altri fisici, dopo aver ripetuto senza verun successo gli sperimenti di Coulomb, distinsero i corpi in due classi, l' una composta di corpi magnetici a modo del ferro, l'altra d'inerti; e la quantità dei primi, tolti tutti dalla classe dei metalli, non era poi esento d'ogni dubbio, stantechè la debole polarità che alcuni di essi mostravano, dava a parecchi fisici ragion di credere che provvenisse da molecole di ferro diffuse nella loro massa in sì debole quantità, che l'analisi chimica non potesse rilevarne la presenza. E se a tutto questo aggiungiamo che Lebaillif ha trovato che l' antimonio ed il bismuto spiegano sull'ago magnetico una forza ripulsiva, avremo il sunto delle conoscenze che si possedevano intorno all' azione del magnetismo su i diversi corpi, quando Faraday prese a studiare l'azione delle calamite sul maggior numero dei corpi conosciuti.

Egli adoperò elettrocalamite sì rettilinee che voltate a fer-

ro di cavallo, ma sempre di grandissima forza; ed i corpi da esporsi alla loro azione, venivano adagiati in una staffa di carta o di rame sospesa ad un filo di seta o di argento, e riparati dall'agitazione dell'aria coll'esser circondati da un cilindro di vetro aperto nelle due basi.

Quando l'elettromagnete a ferro di cavallo era inerte, Faraday vi sospendeva per mezzo della staffa il corpo da esaminarsi, già ridotto a forma di verghetta parallelepipeda, ed in modo che il centro di sospensione si trovasse nell'intersezione della linea *assiale* coll'*equatoriale* chiamando *assiale* la congiungente i due poli dell'elettromagnete, ed *equatoriale* la perpendicolare al suo punto medio.

Dopo che il parallelepipedo aveva preso il suo equilibrio, s'immetteva la corrente elettrica per la spirale dell'elettromagnete; allora lo si vedeva muoversi e prendere un equilibrio stabile secondo l'assiale o secondo l'equatoriale, a norma ch'era fatto di una sostanza piuttosto che di un'altra.

L'equilibrio stabile del parallelepipedo secondo l'equatoriale dimostrava che la sostanza di cui era formato, veniva ripulso dai due poli della calamita, mentre l'equilibrio nell'assiale dichiarava in vece una forza attrattiva. Ed a rifermare la prima di queste due illazioni Faraday fece di quelle stesse sostanze dei piccoli cubi, che sospesi a fili di seta avvicinò ad un elettromagnete rettilineo; li vide da questo ripulsi in tutti i piani condotti per l'assiale.

Egli estese ancora le sue ricerche anche ai liquidi che poneva ad esperimento chiudendoli in recipienti cilindrici che terminavano in un beccuccio rivolto all'insù; e trovò che alcuni si dirigevano secondo l'assiale altri secondo l'equatoriale.

Per alcune considerazioni, ch'esporremo nell'Ottica, egli denominò *diamagnetici* i corpi ripulsi dai due poli delle calamite. Tra i metalli col metodo suindicato trovò diamagnetici:

Il bismuto, l'antimonio, lo zinco, lo stagno, il cadmio, il mercurio, l'argento, il rame, l'oro ed il piombo.

E tra i non metallici:

Cristallo di monte, solfato di calce, solfato di barite, solfato di soda, solfato di potassa, solfato di magnesia, allumè, idroclorato di ammoniaca, clo-

ruro di piombo, cloruro di sodio, nitrato di piombo, carbonato di soda, spato d'Islanda, acetato di piombo, tartrato di potassa e di soda, acido tartrico, acqua, alcool, etere, acido nitrico, acido solforico, acido cloridrico, diverse soluzioni di sali alcalini e terrosi, vetro, litargirio, arsenico bianco, sodio, fosforo, solfo, resina, spermaceto, caffeina, cinconina, acido margarico, cera di Spagna, cera lacca, olio di olive, olio di trementina, lustrino, gomma elastica, zucchero, sego, gomma arabica, legno, avorio, montone fresco, manzo secco, cuojo, mela, pane.

Niun corpo solido o liquido Faraday rinvenne che fosse neutro rispetto all'azione del magnetismo, ma vide che se ne potevano comporre unendo secondo una certa ragione di quantità un corpo della prima specie ad un altro della seconda. Così sciogliendo secondo una certa proporzione il persolfato di ferro, sostanza magnetica, nell'acqua che fa parte della classe dei corpi ripulsi dai due poli della calamita, si avrà un corpo che non sarà nè attratto nè ripulso dall'elettromagnete.

Dalle prime sue ricerche Faraday aveva dedotto che i corpi aeriformi fossero i soli perfettamente neutri rispetto al magnetismo. Ma dietro le osservazioni del P. Bancalari, il quale ha trovato che le fiamme, avvicinate ai poli di un elettromagnete, per alcune posizioni diminuiscono di altezza crescendo in larghezza, mentre per altre posizioni soffrono opposte alterazioni, sempre però con luce più intensa; Faraday è ritornato sulla stessa quistione e con ingegnosi sperimenti ha rinvenuto che alcuni dei corpi aeriformi si dispongono secondo la linea assiale, altri secondo l'equatoriale.

Egli trovò inoltre magnetiche a modo del ferro tutte le combinazioni in cui questo metallo entra basicamente; come.

Il protocloruro ed il percloruro, il joduro, il persolfato e protosolfato, il perfosfato e protofosfato, il nitrato, il carbonato, il prussiato turchino;

e tra i prodotti naturali:

il ferro ossidulato, l'ematiste, il cromato di ferro, la pirite marziale, la pirite arsenicale, le piriti di rame ed alcuni altri solfuri ferruginosi.

Purissimi cristalli di solfato di nickel e di cobalto, le loro soluzioni e quelle dei cloruri degli stessi metalli, riuscirono tutti magnetici a modo del ferro. E di questa intima relazione tra il magnetismo dei metalli e quello dei loro composti chimici egli si servì per decidere se la forza magnetica di alcuni

di essi potesse attribuirsi alla presenza del ferro. Or egli trovò che si dirigevano secondo l'assiale:

L'ossido di titanio; gli ossidi e specialmente il protossido, il cloruro, il solfato, l'ammonio-solfato, il borato ed il carbonato di manganese; il protossido idrato, il cloruro ed il carbonato di cerio; il doppio solfato di potassa ed ossido di cerio; l'ossido cristallizzato di cromo e l'acido cromico.

Da ciò Faraday conchiuse che il *titanio*, il *manganese*, il *cerio* ed il *cromo* sono magnetici a modo del ferro. Analoghe sperienze lo indussero ad annoverare nella stessa classe il *platino*, il *palladio* e probabilmente l' *osmio*. Al contrario furono ripulsi dai poli dell'elettromagnete, sì nello stato puro che in quello di combinazione chimica:

L'arsenico, l'irridio, il sodio, l'uranio, il tunsteno, l'argento, l'antimonio, il bismuto, il sodio, il magnesio, il calcio, lo stronzio, il bario, il potassio.

Or da queste scoverte di Faraday sulle opposte azioni che il magnetismo esercita su i diversi corpi della Natura, derivano due importanti conseguenze — 1ª Che il pendolo destinato alla misura della gravità terrestre, dev'esser fatto di sostanze magnetiche, e per avventura lo si è fatto con palla di platino, che è magnetico nella stessa guisa del ferro; stante che le sostanze diamagnetiche dovranno soffrire una perdita di peso proporzionale all'energia del magnetismo terrestre nel luogo e nel tempo dell'esperimento — 2ª Che pel diamagnetismo del mercurio potranno avvenire variazioni barometriche, che lungi di corrispondere a proporzionati cangiamenti nella pressione dell'aria, dipenderanno forse da variazioni del magnetismo terrestre.

CAPO SETTIMO.

INVENZIONE DELLA PILA.

258. Sul finire dello scorso secolo Galvani, professore di Anatomia a Bologna, all'uopo di alcune sue ricerche preparava delle rane in modo che ad un pezzo della colonna vertebrale rimanessero congiunte le cosce pei soli nervi crurali. Una rana Scoverta di Galvani.

25

così preparata trovavasi un giorno sopra una tavola a piccola distanza da una macchina elettrica, e mentre un ajutante dei Galvani toccava collo scalpello anatomico i nervi crurali, un altro trasse una scintilla dal conduttore della macchina, e si vide con sorpresa che le cosce dell'animale fortemente si convellevano. Ripetendo la pruova sotto diverse forme, si venne a conoscere che a far divincolare la rana per mezzo del salto della scintilla, faceva mestiere che essa fosse in comunicazione con un conduttore non isolato, imperocchè sospeso il corpo dell'animale ad un filo di seta, i convellimenti nón ebbero più luogo.

Galvani comprese che il fenomeno dipendeva da elettricità indotta nel corpo della rana dal conduttore della macchina: rifece i suoi esperimenti sopra altri animali; li riprodusse ancora per mezzo dell'elettricità temporalesca, e n'ebbe sempre i medesimi effetti.

Volle ancora mettere a cimento l'ordinaria elettricità atmosferica a ciel sereno, ed a tal uopo per mezzo di un filo di rame attaccato al tronco vertebrale della rana egli la sospese all'inferriata che serviva di parapetto ad un terrazzo della sua casa: le convulsioni non mancarono, e le stimò prodotte da vicessitudini nell' elettricità atmosferica. Ma avendo cercato invano per più giorni consecutivi di riprodurre lo stesso fenomeno, egli si avvisò di poggiare il filo di rame sul parapetto che così veniva a toccare i piedi della rana, e le convulsioni riapparvero. Lo stesso risultamento ebbe ancora ripetendo l'esperimento nell'interno di una stanza, e poggiando il filo di rame sopra lamine di metallo diverso dal ferro; le convulsioni però non apparivano quando tra la lamina metallica ed il corpo dell'animale stava interposto un coibente.

Da questi ultimi fatti chiaro appariva come l'elettricità, che faceva divincolare la rana, non provvenisse dall'atmosfera. Galvani pensò che risedesse nel corpo stesso dell' animale, e che dai nervi si scaricasse su i muscoli per la via dell'arco metallico. E delle molte sperienze ch'egli fece a sostegno di questo suo concetto ci piace rammentare la seguente che meglio delle

altre lo pone in tutto il suo lume. Tenendo con una mano sospesa ad un filo metallico la rana già preparata ed in modo da poggiare coi piedi sopra un bacino di argento, e toccando questo con un pezzo di ferro che teneva nell'altra mano, egli vide la rana commoversi nell'istante in cui chiudeva il circuito. E lo stesso effetto egli ebbe, quando tenendosi per mano con un secondo osservatore, come se avessero a scaricare una boccia di Leyden, uno di essi teneva sospesa la rana, mentre l'altro toccava il bacino di argento.

Così Galvani chiariva il suo concetto di un'elettricità propria della rana, e che dai nervi per mezzo di un arco metallico si scaricasse sui muscoli. Eravi però una condizione da lui stesso scoverta, la quale sfuggiva all'analogia della rana colla boccia di Leyden, ed è quella che l'arco formato di due metalli riesce incomparabilmente più efficace della congiunzione eseguita con un metallo solo.

259. La scoverta del perchè l'arco eterogeneo riesca più efficace, era riservata a Volta. Il quale all'annunzio delle meravigliose invenzioni del Galvani si fece a ripeterne gli sperimenti quasi disperando del successo, essendochè i fatti annunziati dall'anatomico bolognese non avevano riscontro alcuno nelle cognizioni elettriche di quel tempo. Ma quando n'ebbe veduta la realtà, il suo entusiasmo fu colmo, imperocchè egli trovava fatta palese quell'elettricità propria dell'organismo, che non pochi fisiologi avevano supposta qual cagione immediata dell'azione nervosa. Scoverta dell'elettricità per contatto.

Egli vide bentosto come al progresso dalla nuova dottrina dovesse tornar utile il definire sperimentalmente la vera direzione della scarica nella nuova specie di coibente armato che ne presentava la rana. Ed a tal uopo, partendo dal fatto che due bocce di Leyden non saprebbero scaricarsi a vicenda ove non fossero congiunte per le armature eteronime, egli preparata la rana al modo di Galvani e caricata debolmente una piccola boccia, pose a contatto talvolta i nervi coll'armatura interna ed i muscoli coll'esterna, talaltra viceversa i muscoli colla prima armatura ed i nervi colla seconda, e trovò che nel primo modo

di congiunzione bastava per far convellere la rana una carica 6 ad 8 volte minore di quella che si richiedeva nel secondo. Donde egli conchiuse che i nervi e l'armatura interna avevano elettricità eteronime, e che in conseguenza, contrariamente all'opinione di Galvani, l'elettrico dovesse muovere dai muscoli ai nervi.

Persuaso il Volta che l'esistenza di un'elettricità animale fosse stata abbastanza dimostrata dai fatti scoverti da Galvani, egli si diede a ricercare tra quali parti dell'organismo lo sbilancio elettrico esistesse; ma quando nella serie dei suoi svariati sperimenti venne a quello di armare di foglie metalliche due punti presi sullo stesso nervo crurale, e congiunte le due armature con un arco metallico vide che la rana pur si convelleva, allora gli venne meno quell'entusiasmo con cui aveva abbracciato il sistema di Galvani; e distrutta nel suo pensiero l'analogia della rana colla boccia di Leyden, l'influenza dell'eterogeneità dell'arco congiuntivo, a cui sulle prime non aveva fatta alcuna attenzione, gli si addimostrò di tanta importanza da considerarla come unica cagione dei fenomeni galvanici.

Conoscendo che la punta della lingua è affetta da sapore acido od alcalino, secondochè si farà comunicare col conduttore positivo o col negativo di una macchina elettrica in azione, egli armò la sua lingua di una laminetta di zinco verso la punta e di una moneta di argento nel mezzo [1], ed intese un sapore decisamente acido, quando le due armature furono avvicinate fino a toccarsi. Invertì poi l'ordine delle due armature, ed ebbe talvolta un senso di sapore alcalino alquanto confuso, che poi gli riuscì deciso e costante, quando ebbe scoverto che il carbone ricotto è preferibile all'argento nel comporre una simile armatura in compagnia dello zinco. Analoghi sperimenti fece sulle congiunzioni binarie di altri metalli, e venne così nella sentenza che nel contatto di due metalli eterogenei siavi eccitamento di una forza, da lui perciò denomina-

[1] Allora Volta non sapeva che questo sperimento era stato già fatto da Sulzer 25 anni prima.

ta *forza elettromotrice*, la quale spinga l'elettrico dall'uno nell'altro, e renda in conseguenza il primo elettronegativo, ed elettropositivo il secondo. Ed a sostenere questo suo concetto contro i nuovi fatti che i seguaci di Galvani gli opponevano a sostegno dell'elettricità animale, egli faceva osservare come le più lievi differenze nelle estremità di un arco metallico valessero a renderlo elettromotore. Così egli trovava che per un arco di ferro bastava ricuocerne un estremo ovvero scaldarne una punta immergendola per qualche minuto nell'acqua bollente, perchè portato sulla rana preparata vi eccitasse violente commozioni; e similmente osservava come bastasse a rendere elettromotore un arco di piombo, il lasciare uno degli estremi coverto da quel velo di ossido che vi forma il lungo contatto dell'aria, e scovrire la faccia metallica dell'altro per mezzo di un temperino.

Egli trovò inoltre che anche i liquidi conduttori spiegano in contatto dei metalli una forza elettromotrice. Così egli prendeva una rana preparata al modo di Galvani, ed in due bicchierini pieni della stessa acqua immergeva nell'uno i nervi crurali, e le gambe nell'altro; indi chiudeva il circuito con un arco di argento ben terso, e la rana si rimaneva immobile. Ma se scioglieva in uno dei bicchierini un poco di solfuro di potassio, immediatamente la rana si convelleva per l'azione del solfuro sull' argento. Eguali risultamenti otteneva con un arco di ferro bagnato in un estremo con acido nitrico prima di toccare l'acqua dei bicchierini. Ed andremmo assai per le lunghe, se volessimo riferire tutte le pruove dell'azione elettromotrice tra liquidi e solidi, messe innanzi dal Volta; non possiamo pertanto non esporne una che meglio di tutte mette in piena luce il potere elettromotore risultante da una azione chimica. Egli prese una coppa di stagno piena di un liquido alcalino, e tenendola con una mano bagnata con acqua salata recò la punta della lingua a contatto del liquido: la prima impressione che n'ebbe fu quella di un sapore decisamente acido.

Continuando nella serie delle sue ricerche Volta conobbe

che sviluppo di forza elettromotrice non manca nel contatto di liquidi con liquidi, e di questi coi solidi non metallici. Così fatti pescare in due bicchierini pieni di acqua semplice, nell'uno le gambe e nell'altro i nervi crurali di una rana preparata, egli la vedeva convellersi quando il circuito era chiuso da un pezzo di cartone bagnato, che con uno degli estremi aveva precedentemente toccato un liquido alcalino. Osservava pertanto che la forza elettromotrice svolta in queste circostanze era inferiore a quella prodotta dal mutuo contatto dei metalli, o da quello dell'argento col solfuro di potassio e del ferro coll'acido nitrico. Quindi venne a distinguere i conduttori in due classi; chiamò *conduttori della 1ª classe* i metalli ed il carbone, e *conduttori della 2ª classe* i liquidi ed i solidi conduttori non metallici; e stabilì dietro risultamenti di molte sperienze che in ogni combinazione ternaria di due conduttori della 1ª classe con uno della 2ª i due primi fanno da elettromotori ed il terzo non fa che trasmettere il movimento elettrico.

Nelle sperienze di Galvani e di Volta finora descritte l'azione elettrica in realtà non era che supposta: Volta pensò renderla manifesta per mezzo d'indicazioni elettroscopiche. A tal uopo egli prese due dischi, l'uno di argento e l'altro di zinco, e li portò a mutuo contatto, tenendoli per mezzo di manubrii isolanti infissi ai loro centri; indi li separò parallelamente a loro stessi, e recatone uno a contatto di un buon elettroscopio di Bennet, vide divergere le foglie d'oro di 2 a 3 linee: i dischi però erano ben tersi e piani, e l'ambiente era secco. Volle ancora adoperare l'elettroscopio condensatore per ottenere più spiccata indicazione elettrica; ed in una delle sue sperienze, dietro contatti ripetuti fino ad 80 volte gli riuscì dare tal carica all'istrumento da poterne trarre una piccola scintilla.

Dietro questi fatti non poteva esservi più dubbio sullo svolgimento elettrico per contatto, ed in conseguenza la cagione dei fenomeni scoverti dal Galvani veniva ad essere pienamente dichiarata.

Costruzione della pila

260. Combinando l'idea di una forza che svolta nel contatto

di due metalli differenti spinge l'elettrico dall'uno nell'altro, con quella di una continua tendenza dello stesso fluido ad equilibrarsi e che può esser soddisfatta per opera di un conduttore di 2ª classe, Volta pervenne alla stupenda invenzione della pila. Seguendo le sue idee, immaginiamo che ad una coppia di un disco *a* di argento con un altro *z* di zinco (Fig. 236) sia soprapposta una rotella di cartone bagnato, quindi una 2ª coppia *a'z'* degli stessi metalli. L'argento divenendo elettronegativo in contatto dello zinco, l'elettrico moverà dal suolo in *a* e da questo in *z*, finchè la forza che lo spinge dal primo disco nel secondo non resti equilibrata dalla tendenza che ha di ritornare da *z* in *a*. Il conduttore umido frapposto alle coppie *az* ed *a'z'* agevolando il passaggio dell'elettrico da *z* in *a'*, farà che questi due dischi abbiano una stessa tensione, mentre la forza elettromatrice tra *a'* e *z'*, identica a quella che esiste tra *a* e *z*, dovrà dare a *z'* rispetto ad *a'* il medesimo eccesso elettrico che ha luogo tra *z* ed *a*. Laonde se indichiamo con 1 l'eccesso elettrico di *z* su *a*, sarà anche 1 la tensione di *a'*, e quindi 2 quella di *z'*; e se alla coppia *a'z'* soprapponiamo un' altra rotella di cartone bagnato e quindi la coppia *a''z''*, sarà 2 la tensione di *a''* e 3 quella di *z''*. Quindi se *n* coppie di argento e zinco siano soprapposte l'una all' altra intercalandovi dei conduttori umidi, si avrà una colonna o *pila*, carica di elettricità positiva crescente dal basso in alto proporzionatamente al numero delle coppie.

Egli è facile a comprendersi che la pila sarebbe similmente carica di elettricità negativa, se l'ordinamento delle coppie fosse invertito, vale a dire che la comunicazione col suolo avesse luogo per mezzo dello zinco anzichè dell'argento.

Queste illazioni furono da Volta verificate per mezzo del suo elettrometro a paglie; ed egli ne dedusse che moltiplicandosi a sufficienza il numero delle coppie si sarebbe ottenuta sì forte tensione nella sommità della colonna, che toccandola con una mano, mentre l'altra ne sta a contatto della base, l'elettrico sarebbesi slanciato da un capo all'altro della colonna attraverso le braccia dell'osservatore, e vi avrebbe prodotta una com-

mozione analoga a quella che dà la boccia di Leyden. Questa conseguenza fu del pari verificata, e la pila (per l'analoga dei suoi effetti con quelli dei pesci elettrici) fu annunziata dall'inventore sotto il nome di *organo elettrico artificiale.*

Abbiamo supposto finora che la pila toccasse il suolo con una delle sue coppie estreme; poniamo che in vece fosse montata sopra una base isolante. In questo caso, stando alla teoria di Volta, la pila non potrà caricarsi altrimenti che accumulando in alcune delle sue coppie l'elettrico tolto dalle altre. Chiamando x la tensione elettrica del disco di argento che forma uno degli estremi della colonna che supponiamo composta di n coppie, le tensioni degli n dischi di argento per le cose anzidette formeranno la progressione aritmetica:

$$x\,,\; x+1\,,\; x+2\,,\; x+3\,,\; \ldots\; x+n-1\,,$$

e gli n dischi di zinco daranno l'altra:

$$x+1\,,\; x+2\,,\; x+3\,,\; \ldots\; x+n.$$

La somma $\frac{(2x+n-1)n}{2}$ degli n termini della 1ª progressione, e l'altra $\frac{(2x+n+1)n}{2}$ dei termini della 2ª, unite insieme daranno la quantità elettrica esistente nella pila. Ma poichè questa quantità non è diversa da quella che gli elementi della pila contenevano nel loro stato naturale; così la somma che la rappresenta, dovrà essere pareggiata a zero, e si ha la relazione:

$$\frac{(2x+n-1)n}{2}+\frac{(2x+n+1)n}{2}=0\,,$$

ossia: $2x+n=0$, donde $x=-\frac{n}{2}$.

Le tensioni dunque formeranno pei dischi di argento la progressione:

$$-\frac{n}{2}\,,\; -\frac{n}{2}+1\,,\; \ldots\ldots\; -\frac{n}{2}+n-2\,,\; -\frac{n}{2}+n-1$$

e per quelli di zinco la progressione:

$$-\frac{n}{2}+1\,,\; -\frac{n}{2}+2\,,\; \ldots\ldots\; \frac{n}{2}+n-1\,,\; -\frac{n}{2}+n.$$

Ponendo, per esempio, che sia $n=8$, si avranno le due progressioni:

Argento : $-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$
Zinco : $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$.

Saranno dunque allo stato naturale i due dischi medii della pila, l'uno di zinco e l'altro di argento separati da un conduttore umido.

Se poi n fosse impari, e fosse per esempio $n=7$, avremmo le due progressioni:

Argento : $-\frac{7}{2}, -\frac{5}{2}, -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$

Zinco : $-\frac{5}{2}, -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$;

ed il passaggio avrebbe luogo dal negativo al positivo senza toccare lo stato naturale.

Tanto però in un caso che nell'altro una metà della pila sarà elettropositiva, l'altra elettronegativa; e queste due elettricità avranno una tensione crescente dal mezzo agli estremi, che perciò hanno ricevuto il nome di *poli*: denominazione ammessa ancora per dinotare i dischi estremi di una pila comunicante col suolo, e che hanno le tensioni 0 e n.

È d'uopo pertanto osservare che la forma di colonna data alla pila mal risponderebbe a ricerche che fossero dirette a verificare queste illazioni teoretiche, imperocchè il liquido, che spremuto dai cartoni pel peso dei dischi soprapposti, scende pei lati della pila, ne turba l'ordinamento elettrico. E Volta comprendendo che questa perturbazione avrebbe scemata la forza dell'apparecchio, propose dividerlo in più colonne, congiunte pei loro estremi in modo (Fig. 237) da conservare quella successione di coppie che si avrebbe ordinandole in una sola colonna. Intanto con una forma di pila meglio adatta all'uopo, il prof. Buff in Germania ha verificato i risultamenti numerici di sopra ottenuti.

Finora abbiamo supposto che i due dischi di ogni coppia fossero semplicemente adagiati l'uno sull'altro; ma in realtà quelli di zinco e rame, di cui si usa comporre le pile a colonne, sono saldati insieme. E ciò oltre al vantaggio di un perfetto contatto reca eziandio l'altro di far combaciare delle facce nettamente metalliche, la qual cosa non è di lieve momento pel maggiore effetto della pila; imperocchè se ci faremo a ripetere l'esperimento del contatto di due dischi, l'uno di zinco e l'altro di rame, infissi a manubrii isolanti, troveremo che la ripetizione dei contatti non gioverà a dare una sensibile carica al condensatore, se le facce dei dischi non siano state recentemente scoverte e spianate al torno.

Egli è vero che quando i due elementi di una coppia sono saldati, essi non si toccano altrimenti che per mezzo dello stagno che li unisce; ma questo terzo metallo interposto non apporta verun cangiamento allo stato elettrico che sarebbe risultato da immediato contatto, imperocchè Volta soprapponendo l'uno all'altro più dischi di diverso metallo, vide che il primo e l'ultimo prendevano quella dose e specie di elettricità, che poi manifestavano toccandosi immediatamente. E per convincersi che la cosa vada così, basterà fare che i due dischi di un elettroscopio condensatore siano l'uno di zinco e l'altro di rame; stante che allora uniti i due dischi per mezzo di un filo di rame ed osservata la divergenza delle laminette d'oro al momento che il disco superiore sarà separato dall'inferiore, si vedrà quella divergenza risultar sempre la stessa, di qualunque filo metallico si faccia uso nel ripetere l'esperimento.

Azione chimica della pila.

261. Pervenuto l'annunzio della pila alla Società Reale di Londra, Nicholson e Carlisle si fecero a comporne una con monete di argento e dischi di zinco per osservarne il meraviglioso effetto della commozione. Formata che fu la colonna, i due fisici inglesi si accorsero che dalle rotelle bagnate interposte alle coppie metalliche, veniva fuori del gas idrogeno, e che in conseguenza l'acqua era decomposta dall'azione stessa della pila. E per rifermare questa illazione con una pruova diretta, essi fecero pescare nell'acqua chiusa in un tubo le estremità

di due fili di rame, congiunti ai poli della pila; e videro che delle bollicine gassose si svolgevano dal filo congiunto al polo negativo, mentre l'estremità immersa dell'altro filo coprivasi di uno strato nero; esaminato il gas raccolto nella sommità del tubo, si trovò essere dell'idrogeno. Nicholson poi rifece lo stesso sperimento con due fili di platino, e da ciascuno di questi si videro sorgere delle bolle gassose, che raccolte in due tubi distinti presentarono separati i due elementi dell'acqua, l'ossigeno e l'idrogeno, nella ragione di un volume del primo a due del secondo.

Un apparecchio atto ad ottenere questo modo di decomposizione, o *elettrolisi* come dicono, dell'acqua, è rappresentato nella fig. 245. Si compone di due piccole campane di cristallo piene di acqua e capovolte in un bicchiere contenente lo stesso liquido; due fili di platino attraversano le pareti del recipiente, e schiacciati a modo di laminette, finiscono nell'interno delle due campane destinate a raccogliere separatamente i gas risultanti dalla decomposizione dell'acqua.

Se questo apparecchio riducasi ad una sola campana, nella quale si facciano penetrare le due laminette di platino in modo da restare a piccola distanza tra loro, si avrà il *voltametro* di Faraday, così denominato perchè dà la misura della forza di una pila, mercè la quantità di mescuglio gassoso che vi si forma in un dato tempo.

262. La scoverta della pila fu annunziata al cominciare del 1° anno di questo secolo. Indi a poco, il celebre pubblicista italiano Romagnosi [1] scovriva l'azione della pila in deviare l'a- Galvanometro.

[1] Non ignoro che dei fisici anche italiani hanno trovato dei dubbii su i diritti del Romagnosi a questa importante scoverta. Intanto a pag. 340 del tomo 1° dell'opera: ESSAI THEORIQUE ET EXPERIMENTAL SUR LE GALVANISME PAR M. JEAN ALDINI, pubblicata a Parigi nel 1804, si legge— *Cette nouvelle proprieté du galvanisme* (di calamitare cioè degli aghi di acciajo) *a été constatée par d'autres observateurs, et dernièrement par M. Romanesi* (in vece di Romagnosi) *physicien de Trent; qui a reconnu que le galvanisme faisait décliner l'aiguille aimantée* — L' argomento è senza replica: Aldini conosceva nel 1804 il deviamento dell' ago magnetico prodotto dalla pila e l'attribuiva al Romagnosi; questo deviamento non è stato dunque osservato per la prima volta da Œrsted nel 1819.

go magnetico dal suo meridiano. Questo fatto che doveva spianare la via all' immenso progresso dell' elettrologia in questo secolo, non destò allora verun interesse; ma osservato di nuovo nel 1819 da Œrsted condusse indi a poco Schweigger alla scoverta del galvanometro moltiplicatore, strumento prezioso in tutte le ricerche che si riferiscono a fenomeni della pila.

Noi ritorneremo sulla teoria del galvanometro come ancora su quella dell'azione chimica della pila; ma come abbiamo fatto rispetto a quest'ultima, così ancora riguardo al galvanometro ci è d'uopo darne un'idea, a fine di agevolare l'intelligenza delle cose che andremo ad esporre nel capo seguente.

Immaginiamo (Fig. 246) che un filo metallico *tsnm* sia voltato a modo di telajo rettangolare, e che in mezzo a questo telajo penda sospeso l'ago magnetico *ab*. Se il piano del rettangolo si faccia coincidere con quello del meridiano magnetico, e si congiungano i due capi del filo coi poli di una pila in azione, si vedrà l'ago deviarsi dal suo meridiano per un angolo più o meno grande, secondo che la pila avrà un'energia più o meno grande. Ed il deviamento avrà tale direzione che un osservatore che stesse coricato lungo il filo e che guardando l' ago fosse percosso dalla corrente elettrica dai piedi alla testa, lo vedrebbe sempre deviato alla sua sinistra. Così l' istrumento può nel tempo stesso indicare la forza e la direzione della corrente elettrica.

Se il filo congiungente i due poli di una pila non fa che un solo giro intorno all'ago magnetico, si avrà il così detto *galvanometro semplice*. Ma se a fianco del primo giro il filo ne faccia un secondo, poi un terzo e così di seguito, e che allungandosi a questo modo il cammino della corrente, questa non patisca sensibile diminuzione di forza, allora la moltiplicità dei giri renderà di altrettanto maggiore la forza perturbatrice della corrente, e quel deviamento che sarebbe riuscito insensibile in un galvanometro semplice, si vedrà apparire sotto un arco considerevole in un *galvanometro moltiplicatore*.

Se la corrente spinge l'ago ad allontanarsi dal meridiano magnetico, la forza direttrice (nº 242) tende viceversa a ricondur-

velo; e se a render meno energica questa resistenza si volesse adoperare un ago debolmente calamitato, la forza deviante della corrente scemerebbe in proporzione ed il galvanometro non diverrebbe più sensibile. Il cav. Nobili ha saputo conciliare queste due condizioni inventando il *sistema astatico*, che si compone di due aghi magnetici, fermati parallelamente tra loro ad un medesimo sostegno e che si corrispondono pei poli di diverso nome. Così con un intenso magnetismo essi avranno una forza direttrice tanto più piccola, per quanto sarà minore la differenza delle loro forze magnetiche. Applicando il sistema astatico ad un galvanometro, uno degli aghi, come *ab* (Fig. 246) sta tra le spire del moltiplicatore, l'altro *a'b'* ne resta fuori; e stando alla regola di sopra data, è facile trovare che i lati *ns*, *st* e *tem* del telajo cospirano a spingere i due aghi in un medesimo senso, ma che *mn* vi esercita opposte azioni. Ciò per altro poco monta, stante che l'azione di *mn* sull' ago prossimo supera di assai quella che fa sull'ago più lontano. La fig. 249 rappresenta un galvanometro di questa specie.

CAPO OTTAVO.

DIVERSE FORME DI PILE.

263. Il primo effetto conosciuto nella pila, quello cioè della commozione che si prova congiungendone colle mani i due poli, eccitava la curiosità di osservarlo. Ma la pila a colonna, montata che sia, non può conservare lungo tempo la sua attività, sia perchè le rotelle bagnate si disseccano, sia perchè le facce delle coppie si coprono di ossido; quindi la necessità di disfare la colonna, pulire le coppie e bagnare dinuovo le rotelle interposte. Volta vide questa grave difficoltà, ed a cansarla immaginò la *pila a corona di tazze*, facilissima ad esser allestita e conservata efficace per tutto il tempo che si vuole. Questa pila si compone di lamine voltate ad arco, di cui una metà è Pila a corona di tazze.

di zinco e l'altra di rame, saldate insieme: le quali lamine s'immergono coi loro estremi e sempre nel medesimo ordine in una serie di bicchieri pieni di acqua salata o acidolata con acido solforico, lo zinco in uno dei bicchieri ed il rame in quello che gli sta dappresso. A ristorare l'efficacia di questa pila, quando la si vedrà indebolita, basterà che si aggiunga un poco di sale o di acido nell'acqua dei bicchieri. Ma non ostante questa grande facilità di allestirla e conservarla attiva, la pila a corona di tazze è incomoda pel grande spazio che occupa quando si vuol comporre di molti elementi.

Pila a truogolo.

264. Pochi mesi dopo che Volta ebbe annunziata la sua pila alla Società Reale di Londra, Kruykshanks vi fece un' importante modificazione, cambiandola in un parallelepipedo orizzontale. Questa nuova forma di pila, conosciuta sotto il nome di *pila a truogolo*, consiste in una cassa rettangolare di legno (Fig. 266), nella quale parallelamente alle sue facce minori e dentro incavi scolpiti sull'altre due facce sono fermate con mastice delle coppie rettangolari di zinco e rame; e negli spazii interposti si versa il liquido conduttore. Se a questa facilità di allestire l' apparecchio aggiungasi quella di poterlo comporre di molte e grandi coppie, non che l'altra di prolungarne l'attività col versare di tempo in tempo qualche goccia di acido nelle falde di acqua interposta alle coppie, si comprenderà perchè le prime grandi batterie voltaiche sieno state costruite con pile di questa forma. La grande batteria di 2000 coppie, fatta costruire nel 1806 dalla Società Reale di Londra, non è che un sistema di pile a truogolo, i cui elementi hanno presso che 5 decimetri quadrati di superficie. Con questa pila Davy eseguì le sue belle ricerche sull' arco luminoso, e fece dare alla Chimica un passo gigantesco scovrendo la composizione della potassa e della soda. Della stessa forma è la pila che la Scuola Politecnica francese acquistava nel 1808 per munificenza dell'imperatore. Questa pila è di 600 elementi, ciascuno di 9 decimetri quadrati di superficie; e con essa si ebbero i risultamenti pubblicati nel 1811 da Gay-Lussac e Thénard sotto il titolo : *Recherches physico-chimiques sur la pile.*

265. Mentre Volta faceva stupire il mondo coll'inattesa novità dei fenomeni della pila, Fabroni in Italia e Gautherot in Francia oppugnavano la teoria che aveva menato alla scoverta di quel prodigioso apparecchio; e ponendo per principio che l'ossidazione patita dal metallo più attaccabile della coppia fosse la cagione immediata dello svolgimento elettrico, gittavano la prima base della teoría chimica della pila, che fu poi ricevuta come dottrinale dai fisici specialmente francesi ed inglesi. Vollaston fu uno dei primi ad accogliere la nuova dottrina; e porta tuttavia il suo nome una maniera di pila conforme a questo nuovo principio, quantunque delle pile consimili fossero state già costruite da Novellucci in Italia e da Accum in Olanda. Pila di Wollaston.

Con questa nuova forma di pila, denominata *pila di Wollaston*, si ebbe in mira di sottoporre le due facce dello zinco all'azione chimica del liquido conduttore, ed offrire nel tempo stesso all'elettricità, che se ne svolge, un facile passaggio sul rame della coppia. La fig. 267 rappresenta un elemento di questa pila: in mezzo alla lamina di rame *str* sta fermata per mezzo di due pezzetti di legno la lamina di zinco *zl*; e ciascuna di esse è provveduta di un appendice, come si veggono indicate da *z* ed *s*, pel cui mezzo si stabilisce la catena galvanica, restando fissati con viti ad una medesima traversa di legno lo zinco di una coppia col rame dell'altra. La quale traversa è poi sostenuta da due montanti verticali (Fig. 268), su cui stanno due coppie di ganci, l'una superiore per tenere la pila lontana dal liquido eccitatore contenuto nella serie dei sottostanti bicchieri, l'altra inferiore per tenervela immersa.

Giova che le lamine di zinco adoperate in questa pila siano amalgamate [1]; la qual cosa non solamente produce economia di zinco, stante che allora questo metallo non è attaccato dall'acqua acidulata se non quando il circuito è chiuso; ma serve

[1] Per amalgamare lo zinco basta per poco agitarlo nell'acqua acidulata che lo sveste dell'ossido di cui è naturalmente coperto, indi metterlo a contatto del mercurio, che celeramente vi si diffonderà sopra, dandogli un aspetto inargentato.

ancora a conservare la forza della corrente, poichè in una coppia il cui zinco è amalgamato, l'idrogeno, anzichè sulla superficie di questo metallo, si svolge su quella del rame.

Questa proprietà dello zinco amalgamato, comune allo zinco puro, fu scoverta da Kemp di Edimburgo; e De la Rive ha fatto osservare che se lo zinco del commercio è attaccato dall'acqua ancorchè debolmente acidulata, e svolge l'idrogeno dalla sua superficie quando forma una coppia, ciò dipende dall'esservi contenuti altri metalli, e specialmente il ferro, con cui forma una coppia voltaica.

Pile a casse di rame.

266. La difficoltà di rinvenire nel commercio bicchieri di vetro atti a contenere dei grandi elementi alla maniera di Wollaston, fece che Hart di Glascow ideasse di far servire per recipiente lo stesso elemento rame; e così alla facilità di costruire delle pile a grandi elementi si aggiunse l'economia dello spazio occupato dall'apparecchio. Questa nuova pila, capace di effetti prodigiosi, consiste in una serie di casse di rame di piccola ampiezza in senso normale alle lastre di zinco che debbono contenere. Le casse sono ordinate in altrettanti incavi fatti su i quattro lati longitudinali di un parallelepipedo di legno abbastanza solido, ed una robusta traversa anche di legno tiene sospese tutte le lastre di zinco, che in tal modo si possono in una volta immergere o cavar fuori del liquido eccitatore.

Pile ad elica.

267. Per sempre più falicitare la costruzione delle pile a grandi elementi, il colonnello Offerhaus ideò le pile ad elica, di cui la fig. 269 rappresenta un elemento, che si compone di due lamine, l'una di zinco e l'altra di rame, insieme avvolte intorno ad un cilindro di legno, e che si possono a piacere immergere in un recipiente che contiene il liquido eccitatore. Non dovendo le due lamine comunicare altrimenti tra loro che mediante il liquido in cui stanno immerse, si ha cura d'interporvi, prima di avvolgerle intorno al cilindro di legno, delle strisce di panno parallelamente alla loro lunghezza. Potendosi dare a ciascuna lamina quelle dimensioni che si vogliono, si comprende come con pochi di questi elementi si possa avere una pila di grandissima forza.

268. Gl'infruttuosi tentativi del Volta in voler comporre il suo piliere interamente di sostanze solide, non persuasero i fisici a doverne smettere il pensiero; e già nel 1803 Désormes e Hachette componevano la prima *pila a secco*, interponendo alle coppie metalliche dei suoli di farina mescolata a sal comune. Indi Biot sostituiva alle rotelle di panno bagnato dei dischi di nitrato di potassa fuso; e più tardi De Luc presentava alla Società Reale di Londra la sua *colonna elettrica*, formata di foglie di zinco e carta ramata tagliate a dischi. Ma le pile a secco che il prof. Zamboni fè conoscere nel 1812, superarono di gran lunga tutte le altre. Esse si compongono di piccoli dischi di carta inargentata, che sulla faccia rovescia portano uno strato di perossido di manganese ridotto in polvere. La carta vuol avere il suo ordinario grado di umidità; e se ne avesse più, la pila si mostrerebbe sul principio più attiva, ma non tarderebbe molto a deteriorarsi. I dischi di carta, apparecchiati nel modo che si è detto, vengono ordinati in colonna in modo che la faccia inargentata dell'uno sia a contatto del manganese dell'altro; la colonna è poi sottoposta all'azione di un torchio che riducendone la lunghezza pone a miglior contatto le sostanze elettromotrici, e dopo averla così ridotta la si cuopre di uno strato di gomma lacca, a fine di preservarla dall'azione disfacente dell'aria umida. Pile a secco

Oltre a queste pile ternarie, composte di stagno, manganese e carta, se ne possono costruire ancora delle binarie con carta inargentata o dorata, tagliata in quadretti, e questi soprapposti in modo che la faccia lucida dell'uno sia a contatto della faccia rovescia dell'altro. Quindi avviene che ogni quaderno di queste carte metalliche sia già una pila a secco, che può dare un certo grado di carica al condensatore.

Ciò che sopratutto distingue le pile di Zamboni è l'indefinita durata della loro attività, essendochè quelle costruite dallo stesso inventore conservano tuttavia la loro efficacia, quantunque i seguaci della pura dottrina chimica dell'apparato voltiano le predicessero di non lunga vita. Egli è vero che immediatamente dopo la loro costruzione esse calano alquanto di forza,

ma giungono poi ad una tensione permanente che conservano inalterata, meno le piccole variazioni che vi apportano i cangiamenti di temperatura, ed anche quelli dello stato igrometrico dell'aria, quando non son coperte di uno strato impermeabile all'umidità atmosferica.

Una felice applicazione della permanente attività di queste pile, fatta dallo stesso inventore, fu quella di farle servire all'attuazione di un movimento perpetuo. Immaginiamo che due di queste pile coi poli eteronimi voltati in un medesimo senso siano piantate verticalmente, e che in mezzo ad esse stia sospeso un leggerissimo pendolo. Movendo questo pendolo verso una delle pile, ne verrà attratto, indi respinto verso l'altra, che allora lo attrarrà dal canto suo, per poi respingerlo nuovamente verso la prima. E così avrà luogo un movimento di oscillazione da una sommità all'altra delle due pile, e che applicato come regolatore ad un orologio, si ebbe un cronometro da poter misurare il tempo medio col solo divario di circa sette minuti primi nel corso di un anno.

Un'altra importante applicazione delle pile a secco fu fatta da Bennet, per la costruzione di un sensibilissimo elettroscopio, conosciuto sotto il nome di *elettroscopio di Bohnenberger*, che gli diede una diversa forma. La fig. 270 rappresenta un simile elettroscopio secondo la modificazione fattavi da Becquerel e poi perfezionata da Fechner. In una cassa rettangolare sta orizzontalmente adagiata una pila zamboniana di 800 a 1000 elementi chiusi in un tubo di cristallo, ed i cui poli sono a contatto con due ghiere metalliche che formano le basi del cilindro di cristallo. A queste basi stanno congiunti due fili di metallo che passando attraverso il coperchio della cassa, mettono capo a due dischetti metallici *a* e *b*, tra i quali e giusto nel mezzo dell'intervallo pende una foglietta d'oro, sospesa al pezzo metallico che attraversando la campana, che chiude superiormente l'apparecchio, finisce nel bottone *c*. Tra le opposte ed eguali attrazioni dei poli *a* e *b* la foglia d'oro rimane in equilibrio, ma se le venga comunicata una dose elettrica ancorchè minima, essa sarà attratta dal polo di oppo-

sta elettricità. Così conosceremo ad un tempo l' esistenza di un' azione elettrica, e la specie cui essa va riferita; quindi è che questo elettroscopio riesce utilissimo per osservare l'elettricità svolta per contatto.

Quantunque una pila di Zamboni di un migliaio di elementi dia tal carica al condensatore da poterne trarre una scintilla, purtuttavia essa non darebbe commozione, nè scomporrebbe l'acqua. Ciò dipende dalla grande resistenza che il corpo della pila presenta alla forza elettromotrice, quando questa si fa a spingere l'elettrico pel circuito chiuso. Zamboni vide che aumentando la superficie degli elementi, la pila diveniva più pronta a riacquistare la tensione che aveva prima di soffrire una scarica; e più tardi Delezène costruendone di 2000 elementi a grandi superficie, ne ha ottenuto la scossa e la scomposizione dell'acqua.

269. Eccetto la pila di Zamboni, tutte le altre finora descritte calano rapidamente di energia a misura che si lasciano continuare nella loro azione. Prendendo ad esempio la pila di Wallaston, osserviamo che ne bastano 10 a 12 elementi di ordinaria grandezza, perchè nel momento dell' immersione nei bicchieri un filo di ferro lungo 4 a 5 centimetri e doppio $\frac{1}{4}$ di millimetro, interposto ai poli della pila, venga ad esser fuso pel passaggio della corrente. Ma se lasciando tuttavia le coppie nei bicchieri, si ricongiungano i poli con un filo di ferro eguale al primo, l'effetto termico riuscirà assai più debole; ed ancorchè questa seconda unione dei poli valesse a produrre la fusione del filo, una terza od una quarta ecc. non saranno certamente seguite dal medesimo effetto. Or se quando lo sviluppo termico sarà divenuto così debole da non produrre neppure sensibile roventezza, si tolga la pila dal bagno, si lasci riposare per circa un'ora, ed indi si rimetta nello stesso bagno; si vedrà allora fondersi quello stesso filo di ferro che nell' ultima pruova non si era neppure arroventito. Pile di forza costante.

Questo ripristinamento di forza in conseguenza del riposo della pila è dovuto alla dispersione delle bolle d' idrogeno che durante la prima immersione della pila si erano attaccate alla

superficie del rame. E che la cosa vada giusto così, n'è pruova il seguente fatto osservato da De la Rive. Il quale facendosi a decomporre l'acqua per mezzo di una debole pila, pose il voltametro sotto una campana pneumatica; e quando vide la decomposizione esser divenuta insensibile per l'estremo indebolimento della pila, fece il voto e la decomposizione riapparve; e nel tempo stesso un galvanometro, che trovavasi nel circuito, indicò una corrente più vigorosa.

Ma in qual modo l'idrogeno, che si attacca alla superficie dell'elemento elettro-negativo fa scemare l'energia di una pila? — Questo modo ci è dichiarato dal seguente sperimento di Schönbein. Si uniscano ai capi di un sensibile galvanometro due lamine di platino, una delle quali sia stata per qualche tempo immersa nel gas idrogeno, e si tuffino le due lamine nell'acqua acidulata: si vedrà tosto l'ago galvanometrico indicare l'esistenza di una corrente che attraverso il liquido conduttore va diretta dalla lamina uscita dall'idrogeno all'altra. La prima dunque usciva elettropositiva dal contatto del gas; ed in conseguenza l'azione antivoltaica dell'idrogeno, che si attacca agli elementi elettronegativi di una pila, consiste unicamente nella produzione di una corrente opposta.

Questa azione dell'idrogeno su gli elementi elettronegativi di una pila, e che va sotto il nome di *polarizzazione* o meglio *reazione voltaica*, ci fa comprendere:

— 1.° Perchè le lamine di platino che han servito alla decomposizione dell'acqua per mezzo della pila, producano una corrente opposta quando separate dai reofori sieno congiunte ai capi di un galvanometro.

— 2.° Perchè invertendo a più riprese le congiunzioni di una pila con un voltametro, si abbia maggior quantità di gas di quella che si sarebbe ottenuta se le congiunzioni non fossero variate. È appunto la corrente generata dall'idrogeno, che ad ogn'inversione dei contatti trovandosi cospirante con quella della pila, ne accresce la forza.

Conosciuta così la cagione che fa celeramente scemare l'energia di una pila, non vi erano che due soli mezzi di elimi-

narla; o impedire che l'idrogeno aderisca alla superficie dell'elemento elettronegativo, o trasformarlo in acqua prima che vi giunga.

Il primo di questi due mezzi trovasi attuato nella pila di Sturgeon. Ogni coppia di questa pila si compone di un vase cilindrico A (Fig. 271) di ferro fuso, e pieno di acqua con $\frac{1}{14}$ di acido solforico, e di un cilindro B di zinco amalgamato, sostenuto dal piede C di legno che impedisce il contatto dei due metalli. Per mezzo di lamine di rame, come si vede nella fig., lo zinco di una coppia si unisce al ferro dell'altra, e dalla loro unione si ha la vera coppia voltaica di questa pila. L'aspra superficie che i vasi di ferro fuso presentano interiormente, fa che le bolle d'idrogeno per nulla vi aderiscano; e perciò un galvanometro introdotto nel circuito di questa pila, indicherà una corrente forza costante, finchè si avrà cura di restituire l'acido solforico a misura che andrà perdendosi nella sua combinazione collo zinco.

L'altro mezzo poi, cioè quello dell'ossidazione dell'idrogeno prima che giunga a deporsi sull'elemento elettronegativo, costituisce il principio sul quale sono costruite le pile di Daniell, di Grove, di Bunsen. Una coppia di Daniell è rappresentata nella fig. 272. Una lamina di rame *ab*, voltata a cilindro od a cono troncato aperto lungo un lato, giace nel vase poroso *cd* pieno di soluzione satura di solfato di rame; ed una lamina cilindrica *ef* di zinco sta immersa in una soluzione di solfato di zinco, o in acqua acidulata od anche in una soluzione di sal comune, la quale circondando il vase poroso sta nel recipiente *gh* di vetro o di terra cotta invetriata. Le due lamine hanno delle appendici metalliche per mezzo dello quali si può chiudere il circuito tra i due elementi della coppia, ed anche unire lo zinco dell'una al rame dell' altra, quando più coppie si vogliono ordinare a modo di pila. Sì nell'uno che nell'altro caso la corrente generata dal contatto dello zinco col rame, passando attraverso i due liquidi separati dal vase poroso, scompone la soluzione di solfato di rame; l'ossigeno proveniente dalla decomposizione dell' acqua e l' acido solforico

che nasce da quella del solfato, si portano sull'elemento zinco, mentre l'idrogeno toglie all'ossido di rame l'equivalente di ossigeno per la ricomposizione dell'acqua, ed il rame così ridotto si depone sull' elemento elettronegativo della coppia. Ed affinchè la mancanza del solfato di rame non facesse scemare l'energia della pila, la lamina di rame *ab* è provveduta del setto forato *z*, che si ha cura di tener sempre carico di pezzetti di solfato di rame.

Sostituendo alla lamina di rame un'altra di platino ed alla soluzione di solfato di rame l'acido nitrico puro, si ha la coppia di Grove, nella quale l' idrogeno toglie all' acido nitrico l'equivalente di ossigeno, e perciò se ne sviluppano dei vapori di acido nitroso. E similmente agisce la coppia di Bunsen in cui il platino è sostituito da un cilindro di carbone, ed in vece dell'acido nitrico puro si adopera quello del commercio. Sì l'una che l'altra di queste coppie voltaiche conservano costante la loro energia, finchè l'acido nitrico non venga ad indebolirsi per l'acqua che continuamente vi aggiunge l' ossidazione dell'idrogeno. Quindi si comprende come Morse, interponendo tra lo zinco ed il platino un secondo vaso poroso pieno di acido solforico concentrato, abbia potuto conservar costante la forza di una pila di Grove per otto giorni continui.

Pile secondarie. 270. Appena fu noto il piliere voltiano, Ritter professore a Jena compose una colonna con dischi di un solo metallo intercalati da conduttori umidi, ne congiunse gli estremi coi poli di una pila, e quando ebbe rotto le comunicazioni trovò la colonna carica di elettricità contraria a quella della pila, e capace di riprodurne gli effetti. Ritter pensò che la carica della *pila secondaria* da lui costruita dipendesse dalla resistenza che la corrente voltaica incontrava nei conduttori umidi intercalati ai dischi metallici; ma se così fosse, le polarità negli estremi corrispondenti delle due colonne dovrebbero risultare omonime, mentre nel fatto riescono eteronime. La vera ragione della polarità elettrica delle pile secondarie sta nella reazione voltaica dell'idrogeno che si svolge nei conduttori umidi per l'azione della corrente; e poichè la tensione elettrica così pro-

dotta è la stessa in tutti gli elementi di una pila secondaria, così si comprende come la scarica di questa pila possa vincere delle resistenze incomparabilmente più grandi di quelle che può superare la corrente primaria. Soltanto fa d'uopo che la carica sia celeramente ripetuta, affinchè le scariche prendano forma di corrente. Poggendorf ne compose una con quattro coppie di lamine di platino, larga ciascuna due pollici quadrati e mezzo, e che immerse in altrettanti truoghi con acqua acidulata, stavano congiunti tra loro e con un elemento di Grove, come indicano le linee punteggiate nella fig. 276. Per mezzo di un commutatore di sua invenzione la pila era 80 volte al minuto caricata, e poi scaricata attraverso un voltametro, e così ebbe 4 a 5 pollici cubici di gas per minuto, mentre il solo elemento di Grove ne avrebbe dato molto di meno.

271. Il fatto della reazione voltaica è stato applicato da Grove a comporre un modo di pila interamente nuovo. La fig. 275 ne rappresenta una coppia. In una boccia di cristallo a tre colli sono introdotti i due tubi H ed O, chiusi superiormente ed aperti nell'estremo inferiore. Per le sommità dei tubi passano dei fili di platino che superiormente finiscono in piccole scodelline dello stesso metallo, le quali riempite di mercurio servono ad unire insieme più elementi voltaici di questa specie; e gli stessi fili sono poi inferiormente saldati a laminette di platino lunghe quanto i tubi. Il collo medio della boccia è chiuso da turacciolo di cristallo, e per quel collo essa va ad esser piena di acqua acidulata. Quando ciò si è fatto, la si capovolge affinchè i due tubi si riempino dell'acqua acidulata, indi si restituisce alla sua posizione normale. Allora si apre il collo medio della boccia, e per mezzo di un tubo ricurvo si empie di gas idrogeno il tubo H, e si fa entrare la metà di un egual volume di ossigeno nel tubo O. Così facendo, il nuovo elemento voltaico è già montato, e poichè la lamina di platino circondata dall'idrogeno dev'essere elettro positiva rispetto a quella che sta nell'ossigeno, la corrente procederà dalla prima alla seconda, e perciò nella scodellina P starà il polo positivo della coppia ed in N il negativo. Pila a gas.

Con una pila di 50 elementi di questa specie Grove ottenne i seguenti effetti — 1° Una scossa fu sentita da cinque persone che chiudevano il circuito tenendosi per le mani — 2° L'ago di un galvanometro di mezzana sensibilità fece una rotazione, e poi si arrestò a 60° — 3° Un elettroscopio a foglie d'oro indicò una forte tensione polare — 4.° Una brillante scintilla apparve tra due punte di carbone fermate ai poli della pila — 5.° Il ioduro di potassio, l'acido idroclorico e l'acqua furono successivamente decomposti, riunendosi l'ossigeno o l'elemento che ne fa le veci, al polo ossigenò, e l'idrogeno all'altro. E mentre avveniva nel voltametro l'elettrolisi dell'acqua, altrettanto se ne ricomponeva nell'interno di ogni truogo, vedendosi ivi sparire un volume d'idrogeno doppio di quello dell'ossigeno.

CAPO NONO.

ELETTRODINAMICA.

Idea della corrente elettrica.

272. Sappiamo (n° 260) che tra la forza elettromotrice svolta in una pila, e la tendenza dell'agente elettrico a diffondervisi egualmente, si stabilisce un equilibrio che rende la tensione crescente dal mezzo verso gli estremi di una pila isolata, o dal polo comunicante col suolo all'altro nel caso opposto. Or se un filo metallico od altro mezzo di conduzione poniamo che unisca i due poli di una pila, allora la naturale espansività dell'elettrico lo slancerà dal polo positivo al negativo per la via di comunicazione stabilita tra i due poli; ed una costante tensione in tutto il corpo della pila sarebbe la conseguenza di questo slancio, se la forza elettromotrice non intervenisse per far che sia ristabilito il primo modo di equilibrio, il quale attesa l'esterna comunicazione dei due poli sarà distrutto appena riprodotto, indi ristabilito e poi annullato di belnuovo, e così di seguito; dimodochè insieme all'aperta via

tra un polo e l'altro avrà cominciamento un moto elettrico continuo, il quale lungo il corpo della pila procederà dal polo negativo al positivo, e da questo tornerà a quello per l'arco di congiunzione. Avremo così un fenomeno perfettamente simile a quello che si osserva in un'ordinaria macchina elettrica, quando si mette in azione mentre il conduttore sta metallicamente congiunto ai cuscini; e come in questo caso non avvi indizio di tensione sul conduttore, così neppur se ne osserva nei poli di una pila il cui circuito sia chiuso da buon conduttore.

Dietro le quali considerazioni chiaramente si capisce perchè i fili metallici attaccati ai poli di una pila a fine di poterne chiudere il circuito, siano denominati *reofori* (portatori di corrente), od anche *elettrodi* (vie dell'elettrico).

273. Questa idea di corrente, abbastanza dichiarata dalla continuità della commozione, quando colle mani chiudiamo il circuito di un piliere voltaico, è messa fuor d'ogni dubbio dai fatti che seguono. Fatti che la rifermano.

— 1.° Biot e Cuvier montarono una pila a colonna con coppie saldate di zinco e rame intercalate da rotelle di cartone bagnate con soluzione di sal marino. I poli, di cui il negativo giaceva in basso, stettero metallicamente congiunti per più giorni: indi l'apparecchio fu smontato, e si trovarono delle molecole di ossido di zinco sulle facce inferiori dei dischi di rame. Ripetuto lo stesso sperimento con dischi non saldati di rame e zinco, non solamente si rinvennero delle molecole di ossido di zinco sul rame della coppia superiore, ma nella stessa coppia ancora si trovarono delle particelle di rame attaccate allo zinco sovrapposto. Le particelle così trasportate in direzione opposta a quella della loro gravità, ci chiariscono esservi state spinte da una forza necessariamente diretta dal polo negativo verso il positivo.

— 2.° Porret per mezzo di un diaframma poroso divise verticalmente in due la capacità di un recipiente; riempì una delle due cavità con acqua pura, e nell'altra ne versò tanto che bastasse a poter chiudere un circuito per mezzo del dia-

framma. Immerse nella prima cavità l'elettrodo positivo di una vigorosa pila, nell'altra il negativo; e vide che il liquido gradatamente passava dalla prima cavità nella seconda fino ad avere in questa un livello più alto che nella prima. Una forza dunque spingeva il liquido dal polo positivo verso il negativo; ed è notevole che alla buona riuscita dell'esperimento fa d'uopo di un liquido poco conduttore; così lo spirito di vino fa miglior pruova dell'acqua pura, e coll'acqua acidulata non si ottiene affatto.

Scintilla voltaica. 274. La tendenza dell'elettrico a slanciarsi dal polo positivo sul negativo di una pila cresce col numero delle coppie, poichè in ragione di questo numero si aumenta la tensione polare (n° 260) da cui quella tendenza risulta. Quindi è che se di una simile pila avviciniamo a piccolissima distanza le punte estreme dei due reofori, ivi vedremo balenare una serie di scintille, che guardate col microscopio ci presenteranno una serie di globetti incandescenti lanciati dall'estremità del reoforo positivo su quella del reoforo negativo che le sta vicino, e che lasciano delle cavità sul primo reoforo ed accrescono la massa sull'estremità del secondo.

La scintilla che a questo modo balena là dove il circolo voltaico sta interrotto, richiede un'alta tensione polare. Ma si può ottenerla ancora da una sola coppia di Bunsen, qualora s'interrompa il circuito dopo averlo già stabilito; la qual cosa facilmente si ottiene strofinando tra loro le punte dei due reofori, imperocchè così facendo si hanno molti attacchi e distacchi successivi. La scintilla in questo caso non è prodotta da forte tensione polare, ma in vece da una velocità acquistata dalle molecole estreme del reoforo positivo, e per la quale velocità esse si slanciano sul reoforo negativo nel momento del distacco. E quando la pila abbia sufficiente energia, e nell'estremità del reoforo positivo non siavi molta coesione, allora alle prime molecole terranno dietro le seconde, a queste le terze ecc., e la corrente passerà da un elettrodo all'altro sotto forma di arco luminoso.

Arco luminoso. 275. Questo fenomeno, il più sorprendente dell' elettricità

voltaica, fu osservato per la prima volta da H. Davy colla pila di 2000 coppie della Società Reale di Londra. Due coni di carbone, reso deferente da una forte cozione, erano fermati ai capi degli elettrodi; le loro punte furono mantenute per un certo tempo a contatto, indi vennero gradatamente allontanate, ed allora apparve l'arco luminoso, splendente di luce sì viva che l'occhio non poteva guardarla senza rimanerne offeso. Riproducendo questo fenomeno nel voto pneumatico o in un gas incapace di alimentare la combustione, le punte dei carboni arroventiscono senza bruciare; ed allora si vedrà nascere una cavità sulla punta del carbone fermato all'elettrodo positivo, ed una prominenza su quella del carbone congiunto al polo negativo.

Il carbone per la produzione dell'arco luminoso è usato a causa della sua poca tenacità. De la Rive ha ottenuto l'arco luminoso sostituendo la spugna di platino al carbone dell'elettrodo positivo ed un globetto dello stesso metallo indurito dal martello al carbone del polo negativo; invertendo le posizioni della spugna e del globetto, l'arco non ebbe più luogo.

Abbiamo di sopra detto che la scintilla, la quale sorge nel distacco degli elettrodi sia dovuta ad una celerità acquistata dalle molecole del filo conduttore della corrente elettrica, che probabilmente si trasmette per mezzo di una rapidissima vibrazione molecolare. L'arco luminoso ha somministrato il mezzo di chiarire la realtà di questo concetto. Ai reofori di una pila di 100 elementi di Daniell stavano fermati i coni di carbone, e le loro punte erano state grandemente avvicinate senza che la corrente vincesse il loro intervallo: allora una boccia di Leyden fu scaricata su i carboni nella direzione che avrebbe dovuto avervi la corrente voltaica, ed immantinenti si vide sorgere l'arco luminoso.

Alla viva luce che si svolge in questo fenomeno va congiunto un intensissimo calore. Sperimentando con una pila di 600 coppie Despretz non solo ottenne la fusione del carbone, ma l'ebbe ancora volatilizzato sotto forma di una nube nera, che

poi si deponeva sulle pareti del recipiente che racchiudeva l'apparecchio; e con sole 496 coppie della stessa pila vide volatilizzarsi il ferro ed il platino, e fondersi il silicio, il boro, il tunsteno, il palladio e la magnesia.

Fenomeni termici nel filo congiuntivo.

276. L'alta temperatura dell'arco luminoso dimostra che la corrente elettrica svolge calore nei punti del circuito in cui trova maggior resistenza; e la realtà di questo concetto viene rifermata dal seguente sperimento di Warthmann. Il quale coperta che ebbe di sottile foglia metallica una delle palle di un sensibile termoscopio ad aria, vi fece passare una scarica elettrica e non vide alcun indizio di accresciuta temperatura; sostituì poi alla foglia metallica uno strato di sostanza mal conduttrice, come il nerofumo o la polvere di colofonia, e la scarica produsse sensibile svolgimento di calore. Quindi si comprende come Children avendo formato l'arco congiuntivo con una serie di fili metallici tutti di eguali dimensioni e saldati nei loro estremi, abbia trovato che divenivano più caldi quelli che avevano minor potere conduttore.

Or la resistenza che presenta al moto elettrico un circuito voltaico, o parte di esso, non dipende soltanto dalla maggiore o minore conduttibilità della sostanza di cui è fatto, ma dalle sue dimensioni ancora, stante che l'esperienza ha dimostrato, (come qui appresso diremo), che per uno stesso mezzo di conduzione la resistenza è in ragione diretta della sua lunghezza e nell'inversa dell'area di sezione. Quindi si comprende come i fili metallici siano più facili ad arroventire a misura che sono più sottili: così Wallaston trovato che ebbe il mezzo di avere dei fili di platino sottili come quelli di ragno, potè arroventare uno di questi fili con uno dei suoi elementi voltaici che non era più grande di un ditale da cucire.

Le relazioni numeriche, che il calore svolto dal passaggio di una corrente per un filo metallico può avere colla celerità della corrente e colle dimensioni e natura del filo, sono state ricercate da parecchi fisici. Qui ci facciamo ad esporre i risultamenti ottenuti da Ed. Becquerel, che in queste indagini ha saputo dominare l'influenza delle diverse cagioni perturbatri-

ci. Egli ha seguito all'uopo lo stesso metodo con cui Laroche e Bérard determinarono le capacità termiche dei gas (n° 93), sostituendo al serpentino del calorimetro una spirale di vetro intorno alla quale stava avvolto il filo metallico coperto di seta, ed alla corrente del gas quella dell'elettrico. In questo modo si ebbe:

— 1.° Che la quantità di calore svolta in un filo metallico dal passaggio della corrente elettrica, è proporzionale al quadrato della celerità di essa corrente [1].

— 2.° Che date le altre cose eguali, la quantità di calore è in ragione inversa della conduttibilità del filo.

— 3.° Che indipendentemente dalla lunghezza del filo, l'elevazione di temperatura in ogni sezione, supposta costante, sarà sempre la stessa, finchè vi passerà la stessa quantità elettrica.

— 4.° Che date le altre cose eguali, l'elevazione di temperatura seguirà la ragione inversa della 4.ª potenza del diametro del filo.

Tra i fisici che prima di Becquerel si sono occupati dei fenomeni termici dell'arco congiuntivo di una pila, va distinto il Peltier, che nelle sue ricerche all'uopo istituite si avvenne in un fatto inaspettato, quale è quello del raffreddamento che nel luogo della saldatura di due verghette di bismuto ed antimonio produce una corrente elettrica che vada dal primo metallo al secondo; mentre se viceversa la corrente movesse dall'antimonio al bismuto, nella congiunzione dei due metalli si avrebbe accrescimento di temperatura. Ed allo stesso Peltier è dovuto l'apparecchio rappresentato dalla fig. 244, per mezzo del quale se ne può ripetere facilmente la pruova. L'apparecchio non è che un ordinario termometro ad aria, la cui pallina è attraversata da una coppia di verghette di bismuto ed antimonio, le quali si trovano saldate giusto nel centro della pallina termometrica. Facendo che la corrente vada dal bismuto all' antimonio, si vedrà il liquido salire nel cannello del

[1] Qui appresso vedremo che significhi *celerità di una corrente*, e come essa si misuri.

termometro, e discendere viceversa quando la corrente andrà dall'antimonio al bismuto.

Sotto una forma più spiccata fu poi presentato lo stesso fatto da Lenz a Pietroburgo. Nel luogo in cui i due metalli stanno saldati, egli fece che vi fosse una cavità, la quale riempita di mercurio potesse accogliere il piccolo bulbo di un termometro espressamente costruito. Facendo passare la corrente dal bismuto all'antimonio, si vide il termometro scendere a 3°, 5 sotto zero, e quando, tolti via termometro e mercurio, la cavità venne riempita di acqua, questa ghiacciò in 5 minuti.

Correnti termo-elettriche. 277. Il principio della *reazione eguale ed opposta all'azione* si trova verificato nel fatto dei cangiamenti termici che avvengono nella saldatura di un arco congiuntivo eterogeneo. Sappiamo che una corrente, la quale passa da una verghetta di bismuto in un'altra di antimonio, saldate insieme, genera nella congiunzione dei due metalli un abbassamento di temperatura, e che vi produrrebbe invece un aumento di calore se movesse dall'antimonio al bismuto. Or se gli estremi liberi delle due verghette invece di essere uniti ai reofori di una pila, siano congiunti ai capi di un galvanometro moltiplicatore, il cui filo non sia molto sottile nè faccia molti giri, si vedrà sorgere una corrente diretta dal bismuto all'antimonio o da questo a quello, secondochè il luogo della saldatura sarà artificialmente riscaldato o raffreddato. Vale a dire che i cangiamenti termici, attuati nella saldatura dei due metalli, produrranno correnti elettriche diametralmente opposte a quelle che bisognerebbe immettervi per ottenere le stesse variazioni di temperatura.

La scoverta di questa nuova forma di forza elettromotrice, la quale non è propria delle coppie di bismuto ed antimonio, ma di ogni coppia di due verghette di diverso metallo saldate insieme, fu fatta da Seebeck nel 1821, indi applicata da OErsted e Fourier alla composizione di una nuova pila. La quale fu composta di una serie di verghette parallelepipede di bismuto ed antimonio saldate insieme: ogni parallelepipedo di

bismuto aveva un'appendice (Fig. 288) immersa in un vasellino pieno di ghiaccio; affinchè fosse raffreddata la saldatura che l'univa all'antimonio seguente, e quella poi che univa questo antimonio all'altro bismuto veniva riscaldata dalla fiammella di una piccola lucerna a spirito di vino.

Per uno stesso modo di variazione termica l'energia e la direzione della corrente dipendono e dal grado del cangiamento termometrico e dalla natura dei metalli saldati insieme. Quindi è che se basta toccare con un dito la saldatura di una coppia bismuto-antimonio per vedere l'ago galvanometrico muoversi di parecchi gradi, sarà d'uopo un più forte riscaldamento per ottenere una corrente di egual forza da una coppia rame-ferro. E per alcuni di simili accoppiamenti metallici avviene ancóra che la direzione della corrente non dipenda soltanto dal modo della variazione termica ma dal suo grado ancora. Così fino ad un certo eccesso di calore la corrente in una coppia rame-ferro procederà dal primo al secondo metallo, ma poi invertirà la direzione del suo moto, tosto che la temperatura sarà divenuta più elevata.

Non sempre l'azione termica per generare una corrente in un circuito chiuso ha bisogno di rinvenirvi un salto di proprietà fisiche, comparabile a quello che ha luogo nella faccia di congiunzione di due metalli eterogenei; sovente basta all'uopo una lieve differenza, spesso stabilita per gradi infinitesimi. Così Becquerel ha osservato che riscaldando un punto qualunque di un circuito formato da un filo di platino avvolto intorno al telaio di un galvanometro ed unito nei capi estremi, non si produce veruna corrente elettrica; ma se uno dei capi del filo, prima di esser congiunto all'altro, sia girato ad elica o vi sia fatto un nodo, e che il circuito si riscaldi prossimamente al nodo od all'elica, la corrente non tarderà a manifestarsi. Gli stessi segni d'inerzia o di attività si avranno da un filo di rame, secondochè nelle faccette dei capi portati a contatto il metallo sarà interamente scoverto, o sopra una di esse vi sia lasciato il suo strato naturale di ossido, ovvero sia coperta da sottile foglia di altro metallo. Similmente si avrà

corrente elettrica in un circuito fatto con filo di ferro che non abbia in tutta la sua lunghezza la stessa tempera e lo stesso diametro.

Il fatto che la corrente elettrica si genera nello accoppiamento di due metalli per mezzo di quella stessa variazione di temperatura che vi produrrebbe il passaggio di una corrente opposta, ha somministrato al Pacinotti il mezzo di riconoscere in tutti gli accoppiamenti metallici il fenomeno osservato da Peltier (n° 276) in quello dell'antimonio col bismuto, e poi dallo stesso riprodotto nel ferro oligisto, ma inutilmente cercato nel ferro dolce; e ciò perchè il suo metodo non poteva rendere sensibile il cangiamento di temperatura, se non quando era considerevole. Il metodo di Pacinotti consiste in congiungere ai capi di un adatto galvanometro gli estremi della catena di fili su cui si vuole sperimentare, immediatamente dopo che vi è transitata la corrente: se allora l' ago galvanometrico è messo in moto, si avrà la certezza che le saldature sono state alternamente riscaldate e raffreddate dalla corrente che vi è stata immessa, e dal moto del galvanometro sarà facile rilevare quali saldature sieno state riscaldate e quali raffreddate. Ed è tale la squisitezza di questo metodo che il suo autore ha potuto ottenere segni non equivoci di raffreddamento anche adoperando correnti termoelettriche che di tutte sono le più deboli.

Del resto, come lo stesso fisico italiano ha osservato, il freddo non apparisce che alla prima invasione della corrente; e se questa continua, si vedrà sorgere in vece uno accrescimento di calore, che presenterà il fatto notevole di accrescersi dopo che la corrente avrà cessato di transitare.

Formola di Ohm.

278. Dall' insieme delle sperienze voltaiche finora esposte chiaro apparisce che una relazione debba esistere tra gli effetti di una pila, ed il numero la natura e le dimensioni delle sue coppie. Questa relazione si trova numericamente espressa in una formola dovuta ad Ohm, e che ora ci facciamo a brevemente chiarire, seguendo in parte le orme dello stesso inventore.

A tal uopo cominciamo dall'osservare che se delle sperien-

ze decisive (n° 229) hanno messo fuori dubbio che l'elettricità comunicata ad un conduttore stia tutta sulla sua superficie, non possiamo dire altrettanto allorchè l'elettricità per quel corpo si muove. Abbiamo invece ragion di credere che allora il fluido movesse per tutta l'area di sezione del corpo conduttore, stante che l'esperienza ha fatto conoscere come nelle scariche delle batterie di Leyden attraverso dei fili metallici, vi si svolge una quantità di calore che, date le altre cose eguali, sta in una certa ragione coll'area di sezione del filo.

Ma se ciò è probabile per l'elettricità provveniente dalle ordinarie macchine elettriche, è poi certo che abbia luogo (come in seguito vedremo) nel moto elettrico per un circuito voltaico; dimodochè possiamo ritenere come un dato sperimentale che l'elettricità della pila corre per l'area di sezione del corpo che la conduce.

Facciamo inoltre osservare che quando una verga metallica con una delle sue estremità viene a contatto di una sorgente termica costante, le diverse sue falde, successivamente riscaldandosi, acquistano temperature che da un'estremità all'altra della verga formano una serie decrescente. Ed in questa trasfusione termica si suppone che il calore passi da una falda di molecole a quella che immediatamente segue, ed in quantità proporzionale alla differenza termica delle due faldé.

Or se la conduzione termica richiede il riscaldamento delle molecole pel cui mezzo si attua, Ohm ha supposto del pari che l'elettricità voltaica non potesse mettersi in giro senza lo elettrizzamento delle molecole per cui si muove; e se il calore procede da molecola a molecola in quantità proporzionale alla differenza delle loro temperature, Ohm ha supposto ancora che l'elettricità movesse da molecola a molecola in quantità proporzionale alla loro differenza elettrica, prendendo questa espressione in un senso conforme alla dottrina di Franklin.

Premesso ciò, supponiamo con Ohm che in una sezione AB (Fig. 273) fatta normalmente alla lunghezza di un anello omogeneo e di uniforme spessezza, avvenga uno sbilancio elettri-

co, simile a quello che si genera nelle facce a contatto di due metalli eterogenei. Ponendo che per l'avvenuto sbilancio la faccia a sinistra della sezione abbia preso un eccesso di elettricità su quella che rimane a destra, allora l'elettrico correndo a rimettere il primo equilibrio, dovrà fluire nella direzione indicata dalle frecce, elettrizzando in pari tempo ed in serie decrescente tutte le falde di molecole che incontrerà nel suo cammino. E se la cagione dello sbilancio è permanente, tale dovrà essere il moto che ne risulta, ed eguali in conseguenza dovranno essere le quantità elettriche, che in un medesimo tempo passeranno per tutte le sezioni dell'anello. Ma queste sezioni son date tutte eguali; dunque:

Nell' ipotesi di uno sbilancio elettrico permanente in una sezione normale alla lunghezza di un anello omogeneo e di uniforme spessezza, la quantità elettrica trasmessa da molecola a molecola dovrà esser costante.

Or la differenza elettrica delle molecole, a cui la quantità del fluido trasmesso si è supposta proporzionale, deriva dalla resistenza che il corpo oppone al moto del fluido; ed in conseguenza perchè essa produca il passaggio di una data quantità di fluido in un dato tempo, è necessario che stia in ragion diretta di quella resistenza. Ma il corpo da noi immaginato è omogèneo, e perciò deve presentare una stessa resistenza in ogni punto della sua massa; dunque la differenza elettrica delle molecole, che si succedono l'una all'altra nella linea del moto, dev'essere costante. E perciò;

Se in una sezione normale alla lunghezza di un anello omogeneo e di uniforme spessezza avvenga uno sbilancio elettrico permanente, la differenza elettrica nella serie delle falde molecolari, normali alla lunghezza dell' anello, dovrà esser costante.

Mercè questo secondo teorema possiamo geometricamente rappresentare lo stato elettrico delle diverse sezioni dell'anello, fatte normalmente alla sua lunghezza. Ed in vero, immaginiamo l'anello aperto nel luogo dell' eccitamento elettrico, e disteso rettilineamente in AB (Fig. 273 *bis*), e che sotto questa

nuova forma conservi lo stato elettrico che aveva quando era continuo. Se in questa ipotesi dinoteremo colle perpendicolari AE e BC elevate dagli estremi di AB le quantità elettriche esistenti nelle facce della sezione in cui si suppone avvenuto lo sbilancio elettrico, tutte le altre che dai diversi punti della congiungente EC si abbasseranno sulla stessa AB, daranno la misura delle quantità elettriche delle corrispondenti sezioni; imperocchè prendendo sulla EC dei punti equidistanti, come *n*, *t*, *r*, le perpendicolari da questi abbassate sulla AB avranno eguali differenze; e la ragione della differenza di due perpendicolari alla distanza dei loro piedi sarà la stessa che quella della differenza BC—AE ad AB. Or queste proprietà della retta EC non sono che la traduzione geometrica delle proprietà algoritmiche della costante differenza elettrica tra le consecutive falde molecolari dell'anello considerate normalmente alla sua lunghezza.

Per brevità diremo *pendenza della retta* EC il rapporto che la differenza BC—AE delle quantità elettriche esistenti nel luogo dell'eccitamento ha colla lunghezza AB dell'anello, rapporto che dà la misura della differenza elettrica esistente nelle consecutive falde dello stesso anello. Or questo rapporto, ossia pendenza della retta EC, non basterà a far definire le quantità elettriche esistenti nelle diverse sezioni fatte normalmente alla lunghezza dell'anello, quando non siano noti i valori dei due termini della differenza BC—AE. Nei fenomeni galvanici ordinariamente questa differenza è nota senza che lo siano i termini da cui risulta; ed allora essendovi infinite rette parallele ad EC atte a rappresentare lo sbilancio elettrico avvenuto nel luogo dell'eccitamento, la retta che colla sua pendenza dovrà rappresentare lo stato elettrico dell'anello, non potrà esser definita, senza conoscerne un punto. Poniamo, a modo di esempio, che il punto *s* dell'anello sia in comunicazione col suolo; in questa ipotesi la quantità elettrica nella sezione normale condotta per quel punto sarà nulla, e la E'C' menata per lo stesso punto parallelamente ad EC sarà la retta che realmente rappresenterà la distribuzione elettrica nell'anello.

Passiamo ora a considerare la distribuzione elettrica che avrà luogo in un anello che composto di archi diversi per natura e spessezza, offrisse sbilanci elettrici permanenti nelle facce di congiunzione degli archi. Ponendo che in uno di essi l'area di sezione sia *m* volte più grande che in quello che gli sta immediatamente appresso nella direzione del moto elettrico, questo moto (per le cose anzidette) dovrà avere nel primo arco una velocità *m* volte minore che nel secondo; quindi la differenza elettrica molecolare, e con essa la pendenza della retta di distribuzione, dovrà essere nel primo *m* volte più piccola che nel secondo. E similmente si troverà ancora che le pendenze delle rette di distribuzione nei due archi dovranno seguire la ragione inversa dei loro poteri conduttori; dimodochè ponendo diverse le aree di sezione e le facoltà conduttrici, le pendenze di esse rette dovranno essere inversamente proporzionali ai prodotti delle aree di sezione pei poteri conduttori.

Posto ciò, immaginiamo che l'anello sia composto delle due parti AB e BC (Fig. 274) diverse per dimensioni e potere conduttore, e proponiamoci di determinare la linea spezzata *bcef*, che dovrà rappresentare il modo di distribuzione elettrica nelle due parti dell'anello, supponendo date le differenze elettriche o *tensioni ce*, *fg* esistenti nelle facce di contatto B, ed A con C. Ponendo che la figura A*bcef*C sia già costruita, meniamo pei punti *b* ed *e* le *bg* e *kh* parallele ad AC, e dinotiamo con l, s, c la lunghezza, l'area di sezione ed il potere conduttore della parte AB, e con l', s', c' le analoghe quantità per la parte BC: facciamo infine $cd=x$, $fh=y$. Sarà $\frac{x}{l}$ la pendenza della retta *bc*, ed $\frac{y}{l'}$ quella di *ef*; e pel teorema sopra dimostrato, avremo la proporzione:

$$\frac{x}{l}:\frac{y}{l'}=\frac{1}{cs}:\frac{1}{s'c'};$$

donde:

$$\frac{x}{lc's'}=\frac{y}{l'cs}.$$

Or facendo $\frac{l}{cs}=$, $\frac{l'}{c's'}=\lambda'$, valori che Ohm ha denominato *lunghezze ridotte*; e sostituendo nell'ultima equazione tra x ed y i valori di l, ed l' tratti da queste ultime relazioni, avremo:

1. $$\frac{x}{\lambda}=\frac{y}{\lambda'}.$$

Ma chiamando a ed a' le tensioni ce ed fg, avremo: $x=a-de$, $y=a'+de$, quindi:

2. $$x+y=a+a'.$$

Risolvendo queste equazioni 1 e 2, e ponendo $\lambda+\lambda'=\mathrm{L}$, ed $a+a'=\mathrm{A}$, troveremo:

$$x=\frac{\mathrm{A}\lambda}{\mathrm{L}}=\frac{\mathrm{A}l}{\mathrm{L}cs}\ ,\quad y=\frac{\mathrm{A}\lambda'}{\mathrm{L}}=\frac{\mathrm{A}l'}{\mathrm{L}c's'}\ ;$$

donde: $$\frac{x}{l}=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{L}cs}\ ,\quad \frac{y}{l'}=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{L}c's'}.$$

Or le velocità v e v' dell'elettrico nelle due parti AB e BC dell' anello dovendo seguire la ragion diretta composta di quella delle pendenze $\frac{x}{l}$, $\frac{y}{l'}$ e dell'altra de'rispettivi poteri conduttori c e c', avremo:

$$v=\frac{cx}{l}=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{L}s}\ ,\quad v'=\frac{c'y}{l'}=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{L}s'}.$$

E se queste velocità v e v' sieno moltiplicate per le rispettive aree di sezione s ed s', avremo $vs=v's'=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{L}}$ che rappresenterà la quantità dell'elettrico messa in giro dall'azione voltaica per un circuito la cui lunghezza ridotta è L, e nel quale è permanente la somma A di tensioni. Chiamando Q questa quantità di elettrico in giro, si ha la relazione:

$$\mathrm{Q}=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{L}},$$

che costituisce la celebre formola di Ohm.

Applicazioni della formola di Ohm.

279. Vi sono parecchi fenomeni della pila, dei quali non si saprebbe dar ragione, se la formola di Ohm non li presentasse come altrettanti corollarii, eccone alcuni:

— 1.° L'esperienza dimostra che chiudendo il circuito di una pila mercè le stesse appendici metalliche di cui vanno ordinariamente provvisti i suoi elementi, un ago magnetico che sia avvicinato ad un tale circuito farà un numero di oscillazioni che a dati eguali riuscirà indipendente dal numero delle coppie di cui si comporrà la pila. Questo fatto dimostra che la quantità di elettrico che circola per la pila è la stessa che quella che si moverebbe per una sola coppia. Ed infatti, essendo A la tensione ed L la resistenza per una coppia, le analoghe quantità per una pila di n coppie di una stessa specie saranno indicate da nA ed nL; e poichè si ha:

$$\frac{A}{L}=\frac{nA}{nL},$$

dovrà necessariamente la quantità della corrente essere indipendente dal numero delle coppie.

Intanto, in opposizione a questo risultamento, si trova che l'elettrolisi dell'acqua richiede in generale un certo numero di coppie, un numero più grande ne vuole il fenomeno della commozione; vi è dunque una certa relazione tra gli effetti della pila ed il numero delle sue coppie.

Or basta tradurre il fatto nella formola di Ohm, perchè la contraddizione subito sparisca. Ed in vero per ottenere la elettrolisi dell'acqua, è necessario introdurre il voltametro nel circolo della pila, e bisogna interporvi il corpo umano per avere la commozione. Chiamiamo λ la resistenza del voltametro, λ_1 quella del corpo umano; per queste resistenze introdotte nel circolo di una coppia e di n coppie, avremo rispettivamente:

$$Q_1=\frac{A}{L+\lambda}\,,\quad Q_n=\frac{nA}{nL+\lambda}=\frac{A}{L+\frac{\lambda}{n}}\,,$$

$$Q'_1=\frac{A}{L+\lambda_1}\,,\quad Q'_n=\frac{nA}{nL+\lambda_1}=\frac{A}{L+\frac{\lambda_1}{n}}.$$

Dalle quali formole si rileva che Q_n e Q'_n indicheranno valori tantò più grandi di Q_1 e Q'_1, per quanto sarà maggiore n; e che essendo per dati sperimentali $\lambda_1 > \lambda$, è d'uopo che n nella frazione $\frac{\lambda_1}{n}$ rappresenti un numero più grande che in $\frac{\lambda}{n}$, affinchè le due frazioni risultino eguali. A produrre la commozione è necessario dunque che il numero delle coppie sia maggiore che nell'elettrolisi dell'acqua.

— 2.° Nè il numero soltanto, ma la grandezza ancora delle coppie prende parte alla produzione degli effetti voltaici. L'ignizione, per esempio, dei fili metallici richiede elementi voltaici di grandi dimensioni benchè pochi, al contrario per l'elettrolisi dell'acqua e molto più per la commozione si richieggono molti elementi, non importa che sieno piccoli. E tutto ciò viene ancora chiarito dalla formola di Ohm; imperocchè dal principio che la resistenza al moto della corrente debba essere in ragione inversa dell'area di sezione, segue che dando ad un elemento una superficie e quindi un' area di sezione n volte più grande, si avrà una resistenza n volte minore. Laonde se per un dato elemento voltaico si ha la quantità di corrente $\frac{A}{L}$, per un elemento simile che abbia una superficie n volte più grande, la quantità di corrente sarà $\frac{A}{L:n}$; e se a questi due circuiti s'interponga la resistenza λ, le quantità di corrente diverranno:

$$Q_1 = \frac{A}{L+\lambda}, \quad Q'_1 = \frac{A}{\frac{L}{n}+\lambda} = \frac{nA}{L+n\lambda}.$$

Or se λ sia piccolissima rispetto ad L, qual'è appunto il caso di un cortissimo filo metallico, sarà Q'_1 presso che n volte più grande di Q'_1; ma se invece λ è assai grande, come pel caso della commozione, allora si avrà prossimamente $Q'_1 = \frac{A}{\lambda}$, e quindi eguale a Q_1 nell'ipotesi che L sia trascurabile rispetto a λ.

Per questa varia influenza che il numero e la grandezza degli elementi voltaici hanno su gli effetti di una pila, avviene che quando si hanno molte coppie di una medesima specie, il loro ordinamento a forma di catena non è sempre quello che meglio convenga. Nei casi in cui più che il numero vale la grandezza delle coppie, gioverà ordinarle come si vede nei n° I, II, III della fig. 275 *bis*, in cui sei elementi voltaici si veggono successivamente ordinati in pile di tre, due ed una coppia, ciascuna di superficie rispettivamente doppia, tripla, sestupla di quella di ogni elemento dato.

È chiaro che la scelta di uno piuttosto che di un altro di questi ordinamenti vuol esser fatta all'uopo di ottenere il massimo effetto. Per conseguire il quale intento, gioverà tenersi alla seguente regola:

Si avrà massimo effetto dall' azione di più coppie voltaiche, quando sieno ordinate in modo che la resistenza della pila che ne risulta, sia eguale a quella dell'arco di congiunzione dei poli. [1]

[1] Sia n il numero delle coppie date, x quello delle coppie che bisognerà comporre in una sola, affinchè la nuova pila, composta di $\frac{n}{x}$ coppie, risulti di massimo effetto.

Essendo L la resistenza di ciascuna delle coppie date, quella che avrà ogni nuova coppia avente una superficie x volte più grande, sarà $\frac{L}{x}$; quindi per la pila composta di $\frac{n}{x}$ coppie e nel cui circuito è introdotta la resistenza λ, si avrà la quantità di corrente:

$$Q=\frac{\frac{n}{x}A}{\frac{n}{x}\cdot\frac{L}{x}+\lambda}=\frac{Anx}{Ln+\lambda x^2}.$$

Pareggiando a zero la derivata 1ª del 2° membro di questa equazione, avremo, per determinare il valore di x che renderà massimo quello di Q, l'equazione;

$$Ln=\lambda x^2, \text{ donde } x=\sqrt{\frac{Ln}{\lambda}}.$$

Introducendo questo valore di x nell'espressione $\frac{n}{x}\cdot\frac{L}{x}$ della resistenza del-

— 3.° Supponiamo che i capi di un filo metallico, che abbia fatto un sol giro intorno al telaio di un galvanometro, siano congiunti ai poli di una sorgente elettromotrice. Indicando con L la resistenza del circuito e con A la tensione della sorgente, sarà $\frac{A}{L}$ la quantità della corrente ed a questa sarà proporzionale l'azione che ne riceverà l'ago galvanometrico. Or poniamo accresciuta la lunghezza del filo in modo da poterne fare n giri intorno allo stesso telajo: allora chiamando λ la resistenza del filo impiegato per un solo giro, quella dell'intero circuito diverrà $L+(n-1)\lambda$, giacchè un λ è già compreso in L. Ma con n giri si spingerà l'ago come se la tensione fosse divenuta n volte più grande, e quindi l'azione sarà espressa da $\frac{nA}{L+(n-1)\lambda}$; e poichè si ha daltronde la relazione:

$$\frac{A}{L}=\frac{nA}{nL},$$

così è chiaro che colla moltiplicità dei giri si accrescerà il deviamento dell'ago, ed in conseguenza il galvanometro diverrà più sensibile, finchè sarà soddisfatta l'ineguaglianza:

3. $nL>L+(n-1)\lambda$, ossia $(n-1)(L-\lambda)>0$.

Ma rispetto ad un medesimo elettromotore coi medesimi reofori L è costante; se tale ancora fosse λ, l'ineguaglianza 3 sarebbe sempre soddisfatta, essendo $L>\lambda$; e moltiplicando giri la sensibilità del galvanometro sarebbe indefinitamente accresciuta. Ma λ per varie lunghezze di un medesimo filo non può esser costante, imperocchè giovando alla sensibilità del galvanometro che l'ago magnetico sia piuttosto corto e ciò per diminuirne il momento (n° 245), la moltiplicità dei giri nel

la pila composta di $\frac{n}{x}$ coppie, avremo:

$$\frac{n}{x}\cdot\frac{L}{x}=Ln:\frac{Ln}{\lambda}=\lambda:$$

ciò che dimostra la regola data nel testo.

filo galvanometrico non potrà ottenersi senza che si facciano più ordini di spire l'uno all'altro soprapposto ; ed all'effetto galvanometrico nuocerà non solo l'accresciuta lunghezza di ogni spira negli ordini superiori, ma eziandio la loro maggior distanza dall'ago , la quale agisce del pari che un accresciuto valore di λ. Quindi è che per una stessa lunghezza di spira λ prenderà un valore medio tanto più grande , per quanto più grande sarà il numero degli ordini di giri fatti intorno al telajo del galvanometro; ed in conseguenza la sensibilità dell'istrumento avrà toccato il suo limite, quando il valore medio di λ , che dinotiamo con λ'_m , avrà soddisfatta l'equazione:

$$L-\lambda_m=0.$$

Or chiamando λ_1 la resistenza che presenta un solo giro del 1° ordine , è chiaro che si potranno fare tanto più ordini di giri, prima di render soddisfatta l'equazione $L-\lambda'_m=0$, quanto più grande sarà la differenza $L-\lambda_1$, che rappresenta la resistenza dell'apparecchio reomotore. La quale resistenza è minima in una coppia termelettrica , come quella che presenta un circuito interamente metallico ; è assai più grande nelle idroelettriche, quali sono le ordinarie coppie voltaiche ; ed è più grande ancora nella corrente che si ha da una ordinaria macchina elettrica, quando se ne congiunge il conduttore ai cuscini, stante che l'elettrico per assumere allora la forma di corrente deve superare la forte attrazione con cui è ritenuto sulla superficie del disco. Quindi si comprende come un centinaio e mezzo di giri sia sufficiente per dare la massima sensibilità ad un galvanometro destinato alle correnti termoelettriche , e perchè ne bisognino da 500 a 600 per le correnti idroelettriche , e presso a 3000 per le correnti delle ordinarie macchine elettriche.

Quando al filo galvanometrico siasi dato tal numero di giri da far risultare $L-\lambda''_m<0$, l'ineguaglianza 3 rimarrà invertita , ed il moltiplicatore riuscirà meno sensibile del galvanometro semplice. Quindi si comprende perchè i galvanometri a filo assai lungo riescano inerti sotto l'azione delle correnti termoelettriche.

Osserviamo ancora che dovendo essere $L-\lambda_m=0$, perchè la ineguaglianza 3 pervenga al suo limite, allora L diverrà presso che nullo rispetto a $(n-1)\lambda_m$; quindi l'azione del circuito sull'ago galvanometrico sarà prossimamente espressa da $\frac{nA}{(n-1)\lambda_m}$ ossia da $\frac{A}{\lambda_m}$. Or chiamando l la lunghezza di filo a cui corrisponde la resistenza media λ_m, c il suo potere conduttore ed s l'area di sezione, avremo:

$$\frac{A}{\lambda_m}=\frac{Acs}{l}.$$

Donde si rileva che alla maggior sensibilità di un galvanometro giova che il filo sia piuttosto doppio ed ottimo conduttore; e se pei galvanometri a filo lunghissimo, questo si sceglie assai sottile, ciò si pratica affinchè dall'ago non siano troppo lontane le spire degli ordini superiori.

— 4.° Rappresenti AB (Fig.274 *bis*) una porzione di circuito voltaico, sulla quale sieno presi i punti C e D, ed a questi sieno saldati i capi dei fili C*m*D e C*n*D. Conoscendo le speciali resistenze dei fili CD,C*m*D,C*n*D e del rimanente circuito, che ordinatamente indichiamo con λ, λ', λ'' ed L, e la tensione dell'elettromotore, vogliamo determinare le quantità di corrente x, y, z che passeranno pei suddetti tre fili.

Immaginando un quarto filo che sostituito ai tre, CD,C*m*D, C*n*D, lasciasse invariata la quantità di elettrico corrente per l'intero circuito, la sua resistenza k dovrebbe soddisfare l'equazione:

$$\frac{1}{k}=\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda'}+\frac{1}{\lambda''},$$

che risulta dalla condizione che la quantità di corrente $\frac{\omega}{k}$ (ω indicando la differenza elettrica esistente tra i punti C e D) debba pareggiare la somma delle correnti $\frac{\omega}{\lambda}$, $\frac{\omega}{\lambda'}$, $\frac{\omega}{\lambda''}$ che passano pei tre fili CD,C*m*D, C*n*D. Or queste quantità, che ab-

biamo indicate con x, y, z, dovendo stare alla quantità $\frac{A}{L+k}$ che passerebbe pel quarto filo che abbiamo immaginato, in ragione inversa delle rispettive resistenze, avremo le proporzioni:

$$x:\frac{A}{L+k}=k:\lambda\ ,\ y:\frac{A}{L+k}=k:\lambda'\ ,\ z:\frac{A}{L+k}=k:\lambda'\ ;$$

donde: $$x=\frac{A}{L+k}\cdot\frac{k}{\lambda}\ ,\ y=\frac{A}{L+k}\cdot\frac{k}{\lambda'}\ ,\ z=\frac{A}{L+k}\cdot\frac{k}{\lambda''}\ .$$

Determinazione delle costanti della formola di Ohm.

280. La formola $Q=\frac{A}{L}$ suppone che sieno noti i valori numerici di A ed L. Or questi valori saranno facilmente definiti, quando per un dato apparecchio elettromotore si avranno due valori di Q, l'uno corrispondente alla resistenza ignota L, l'altro risultante dall'addizione ad L di una definita lunghezza λ di un dato filo metallico; imperocchè, indicando questi due valori con Q' e Q'', si avranno per determinare le incognite A ed L, le due equazioni:

$$Q'=\frac{A}{L}\ ,\ Q''=\frac{A}{L+\lambda}\cdot$$

I valori Q' e Q'' si avranno agevolmente per mezzo di due speciali galvanometri, l'uno dei quali denominato *bussola dei seni*, è rappresentato dalla fig. 248, l'altro che si vede nella fig. 247 vien detto *bussola delle tangenti*.

Nella bussola dei seni il telaio è mobile intorno al centro dell'ago, per poterlo seguire in tutti i suoi movimenti: così l'ago potrà rimaner sempre parallelo alle spire del telaio, e l'azione con cui la corrente lo devia dal meridiano magnetico, e che agisce sempre in direzione perpendicolare a quella delle spire avrà la stessa ragione di sito coll'asse di figura dell'ago. Indicando con α l'angolo di deviamento prodotto dalla quantità φ di corrente che circola per le spire del telaio, e con f la forza direttrice della terra, sarà $f\,\mathrm{sen}\,\alpha$ la componente di questa forza, presa normalmente alla lunghezza dell'ago; e quindi nell'equilibrio si avrà:

$$\varphi=f\,\mathrm{sen}\,\alpha;$$

vale a dire che la quantità della corrente sarà proporzionale al seno del deviamento da essa prodotto.

Nella bussola poi delle tangenti al telaio colle sue spire trovasi sostituita una larga lamina di rame voltata a zona cilindrica, e che avrà le sue basi sempre parallele al piano del meridiano magnetico: nel centro della zona sta quello dell' ago, che deve essere abbastanza corto affinchè giammai colle sue punte possa oltrepassare le basi della zona. Rappresenti kh (Fig. 277) la direzione della corrente e quindi del meridiano magnetico, da cui l' ago ab sia deviato per l' angolo $boh=\alpha$; sia $bg=\varphi$ la forza con cui la corrente, sempre normale a quel meridiano, ne allontana l'ago, e $bc=f$ disegni la forza direttrice della terra. Prendendo di queste due forze le componenti normali alla lunghezza dell' ago, avremo $bd=\varphi\cos\alpha$ e $be=f\,\text{sen}\,\alpha$ quindi nell'equilibrio sarà:

$$\varphi\cos\alpha=f\,\text{sen}\,\alpha\text{ , donde }\varphi=f\,tg\,\alpha.$$

La quantità φ della corrente sarà dunque proporzionale alla tangente dell'angolo di deviamento.

Immaginiamo, per esempio, che chiusa la bussola delle tangenti nel circuito di un apparecchio voltaico, l' ago resti deviato di 70°, e che questo deviamento poi scenda a 60°, quando al circuito si siano aggiunti 50 metri di un dato filo di rame. Essendo $tg70=2{,}747$ e $tg60°=1{,}732$ si avranno per determinare A ed L le due equazioni:

$$2{,}747=\frac{A}{L}\text{ , }1{,}732=\frac{A}{L+50}\text{ ,}$$

dalle quali risulta $A=234{,}3$ e $L=85{,}3$. È chiaro che unità di questo ultimo numero è l'unità di lunghezza del filo introdotto; e poichè non possono compararsi numeri che non siano riferiti ad una stessa unità, è d' uopo che questo termine di comparazione pel numero che rappresenta A, sia quella corrente per la quale essendo $L=1$, sia anche $\frac{A}{L}=1$, vale a dire quella corrente, che movendo per un circuito la cui resi-

stenza pareggi quella di un metro del filo introdotto, produca nella bussola delle tangenti un deviamento di 45°.

Il valore di L che abbiamo trovato, rappresenta la somma delle resistenze della bussola e della pila. A fine di ottenere i valori individuali di queste resistenze, s'introdurrà nel circuito un secondo elettromotore, simile al primo, e che fatto agir solo, produca lo stesso deviamento nell'ago della bussola. Chiamando x la resistenza della bussola, y quella dell'elettromotore, ed a' la tangente del deviamento ottenuto mercè la introduzione del secondo elettromotore, avremo le due equazioni:

$$a' = \frac{2A}{x+2y}, \quad L = x+y,$$

donde:

$$x = \frac{2(La'-A)}{a'}, \quad y = \frac{2A-La'}{a'}.$$

Così, stando all'esempio precedente, e ponendo che per l'introduzione di un secondo elettromotore eguale al primo, il deviamento risulti di 71°, la cui tangente trigonometrica è 2,904; avremo:

$$x = 9,3 \quad y = 76.$$

Osservazioni su i reometri.

281. Le bussole sì dei seni che delle tangenti, non ostante la precisione con cui danno la misura di una corrente, non hanno purtuttavia quella comparabilità, di cui godono i termometri. Ciò deriva primieramente dalla diversità delle loro dimensioni, la quale fa sì che nelle bussole di diversa grandezza l'ago magnetico si trova a diverse distanze dal conduttore della corrente, e quindi n'è variamente deviato. E nè anche i risultamenti ottenuti da una medesima bussola in luoghi e tempi diversi possono tra loro compararsi, stante che l'energia del magnetismo terrestre che produce la resistenza dell'ago all'azione della corrente, varia per tempo e per luogo. Fortunatamente avviene che ben di rado da simili comparazioni si possa trarre una qualche utilità.

Intanto delle sperienze istituite con introdurre un voltametro nel circuito di cui faceva parte una bussola delle tangenti,

hanno fatto conoscere che la quantità di acqua decomposta in un dato tempo si trova proporzionale alla tangente del deviamento che ne riceve l'ago magnetico. E poichè la resistenza dell'acqua all'elettrolisi non può supporsi varia per luogo e per tempo, il voltametro sarebbe un ottimo reometro, se oltre al non potersi applicare alle correnti che non sono forti abbastanza per decomporre l'acqua, non presentasse il grave inconveniente di non poter indicare le variazioni che durante l'esperimento possono avvenire nella quantità della corrente.

Misura della resistenza dei conduttori.

282. Le ricerche istituite per la misura della resistenza che i conduttori oppongono al moto dell'elettrico, offrono una pruova assai convincente dell'esattezza della formola di Ohm; imperocchè se in un circuito elettrico, di cui faccia parte una bussola reometrica, successivamente s'introducano fili di uno stesso metallo, che abbiano lunghezze direttamente proporzionali alle aree delle rispettive sezioni, si vedrà l'ago magnetico sempre egualmente deviato. La corrente voltaica percorre dunque realmente tutta la massa del filo conduttore; e così resta confermato il principio fondamentale della formola di Ohm.

Il modo di attuare la misura della resistenza dei conduttori è molto semplice. Presa come unità di resistenza quella di un filo metallico, di data natura, lunghezza ed area di sezione, ed introdottane una certa lunghezza nel circuito di una pila di forza costante, si osservi il deviamento definitivo che prenderà l'ago della bussola chiusa in quel circuito: indi si toglierà quel filo ed in sua vece si porrà l'altro, di cui si vorrà misurare la resistenza, e del quale siasi già determinata l'area di sezione; e se ne farà variare la lunghezza finchè l'ago non torni al primo deviamento. Chiamando l la lunghezza del primo filo, la cui area di sezione si è fatta $=1$, l' la lunghezza del secondo, s' l'area della sua sezione, ed r la resistenza, quella del primo essendo $=1$, si avrà pel principio di Ohm:

$$r:1=\frac{l'}{s'}:\frac{l}{1}, \text{ donde } r=\frac{l'}{ls'}.$$

Fatta $=1$ la resistenza del rame, quelle degli altri me-

talli di eguali dimensioni sono riuscite dei seguenti valori:

Argento	= 0,73	Platino	= 4,54
Oro	= 0,97	Ferro	= 5,88
Zinco	= 3,57	Mercurio	= 38,46

Reostato. 283. Un apparecchio comodo per la misura della resistenza dei conduttori e per la risoluzione di altri problemi elettrodinamici è il *reostato* inventato da Wheatstone. Delle diverse forme date a questo apparecchio ci sembra preferibile quella rappresentata dalla fig. 276 *bis*. Si compone di un cilindro di marmo, su cui sta superficialmente scolpita una spira di brevissimo passo, destinata a ricevere un sottile filo metallico, che con un capo si unisce alla fascia di ottone che circonda la base a sinistra del cilindro, e coll'altro ne attraversa la spessezza e va a congiungersi all'asse di rotazione, il quale è metallico. Sull'asta di ottone *ab* è scorrevole la piccola girella *c* dello stesso metallo, la quale in un canaletto scolpito sulla sua circonferenza riceve il filo adagiato nella spira, e lo preme mercè due robuste molle, a cui è fermata l'asta *ab*: così facendo girare il cilindro mercè la manovella *d*, la girella *c* si avvicinerà all'una o all'altra delle basi di esso cilindro, secondo la diversa direzione del moto. E perchè fosse nota la quantità di filo su cui la girella è corsa, l'asta *ab* è divisa in parti eguali, ciascuna delle quali corrisponde ad un'intera rotazione del cilindro, e le frazioni si hanno dalle divisioni segnate sulla fascia di ottone che circonda la base a sinistra dello stesso cilindro. L'istrumento è allo zero delle divisioni, quando la girella tocca il filo nel punto in cui esso penetra nel cilindro per congiungersi all'asse di rotazione.

Poniamo ora che un reoforo della pila sia fermato alla vite *m* in comunicazione coll'asse, l'altra alla vite *n* congiunta alla asta *ab*; la corrente non potrà passare dall'una all'altra vite, senza percorrere tutte le spire del filo metallico, comprese tra l'origine ed il punto in cui la girella gli sta a contatto. Quindi si comprende, come assumendo ad unità di resistenza quella di una sola spira del filo, si possa misurare ogni altra resistenza che non ecceda quella dell'intero filo.

CAPO DECIMO.

ORIGINE DEL POTERE DELLA PILA.

284. Poco tempo dopo l'invenzione della pila, Biot e Cuvier composta che n'ebbero una con coppie di rame e zinco, intercalate da rotelle di cartone bagnate con soluzione salina, la coprirono con una campana di cristallo, la cui base pescava in un recipiente d'acqua: ai due poli della pila stavano attaccati dei fili metallici, che uscendo dalla campana, mettevano capo ad un voltametro. Continuando l'azione della pila, si vide l'acqua a mano a mano elevarsi nell'interno della campana, mentre lo sviluppo dei gas nel voltametro andava diminuendo; e quando questo sviluppo era del tutto cessato, lo si vide ripigliarsi tosto che fu introdotto alquanto ossigeno nella campana. L'ossidazione dello zinco ha dunque la sua parte nella produzione del potere della pila. Influenza dell'azione chimica

Quindi si comprende la ragione per la quale Gassiot ha ottenuto da una pila di 40 coppie montata con acqua semplice, la stessa tensione polare che aveva una simile pila di sole sedici coppie, allestita con acido solforico allungato.

285. È noto che lo zinco amalgamato non si ossida nell'acqua acidulata; ma se venga accoppiato ad una lamina di rame, e poi immerso nella soluzione acida, si avrà abbondante sviluppo di gas idrogeno. Influenza del contatto.

Becquerel, diviso che ebbe un recipiente in due per mezzo di un setto poroso, riempì una delle cavità con soluzione di solfato di rame e l'altra con soluzione di solfato di zinco; ed immerse nella prima cavità una lamina di rame, un'altra di zinco nella seconda. Finchè le due lamine restarono separate, non apparve verun indizio di azione chimica; ma tosto che furono congiunte con un filo metallico, il solfato di rame cominciò a decomporsi, ed il rame, ridotto dall'idrogeno, venne a deporsi sulla lamina dello stesso metallo.

Questi due fatti ci chiariscono sull' influenza del contatto, mostrandoci che debba precedere l'azione chimica, se pur non ne sia la cagione. Ma una pruova diretta della sua importanza si ha dalla seguente sperienza di Zamboni. Questi compose una pila con 10 coppie di rame e piombo, intercalandovi delle rotelle di panno, le quali con acido solforico assai allungato erano state di tanto inumidite, quanto si richiedeva per ottenere, oltre alla tensione polare, anche gli effetti chimici e fisiologici. Indi egli soprappose ad ogni rotella di panno un disco a tanti doppii di carta, da non poter facilmente imbeversi dell'umidità del sottoposto panno; e dalla pila così ordinata egli ebbe la stessa tensione polare di prima, ma verun effetto chimico o fisiologico. In fine egli tolse via i dischi di carta, e ne interpose una sola striscia tra i due metalli di ciascuna coppia; e vide allora che insieme agli effetti chimici e fisiologici della pila spariva ancora la tensione polare. L'immediato contatto dei due elementi di una coppia è dunque condizione necessaria allo sviluppo del suo potere.

Loro speciali funzioni. 286. Ma qual è la speciale funzione dell'azione chimica, ed in che consiste quella del contatto? — A questa dimanda soddisfa pienamente la seguente sperienza del prof. Majocchi [1]. A, B, C, D, (Fig. 287) sono quattro vasi di vetro contenenti acqua salata, nei tre ultimi dei quali stanno immersi dei truoghi di terra cotta non vetriata, pieni di acqua acidulata: tre lamine arcate di zinco, *a*, *b*, *c* mettono in comunicazione l' acqua salata di un vase coll'acqua acidulata del truogo che giace nel vase seguente, ed infine due lamine di platino che per mezzo dei fili *t* ed *n* si uniscono ai capi di un galvanometro, fanno di tutto l'apparecchio un circuito chiuso. Una forte azione chimica si appaleserà sulle porzioni di lamine immerse nell' acqua acidulata, e quindi un copioso svolgimento di materia elettrica, ed intanto sensibile che sia il galvanometro introdotto nel circuito, non si avrà verun indizio di corrente. Ma se la lamina di platino, immersa nell'acqua salata del vase D,

[1] Si veggano le tre interessanti memorie sull' origine della corrente voltaica, dallo stesso pubblicate nel 1845 nei suoi ANNALI DI FISICA.

si porti a contatto dello zinco *c*, l'ago galvanometrico sarà tosto deviato, indicando una corrente diretta dal platino allo zinco, e da questo all' acqua salata; e se invece di toccare lo zinco *c* colla lamina di platino del vase D, si ponga a contatto quella del vase A collo zinco *a*, si avrà una corrente opposta alla prima. Questo risultamento dimostra ad evidenza che l'azione chimica svolge la materia elettrica, ed il contatto la pone in corrente. Quindi, rispetto all'influenza dell'azione chimica sulla tensione polare, si concilia il fatto osservato da Gassiot coll'altro ottenuto da Zamboni interponendo dei fogli di carta tra i metalli delle coppie. Similmente il fallo osservato da Biot e Cuvier, non è più un'obbiezione all'idea di forza elettromotrice generata nel contatto di due metalli, stante che mancato lo svolgimento elettrico per consumo dell'ossigeno, è venuta a mancare la materia da mettersi in moto.

CAPO UNDICESIMO.

FENOMENI D'INDUZIONE.

287. Intorno ad un rocchello di legno si avvolgano insieme due fili di rame vestiti di seta di diverso colore, a fine di poterne distinguere i capi estremi; e di questi capi quelli appartenenti ad uno dei fili si congiungano ad un sensibile galvanometro, gli altri due ai poli di una pila. Nell' istante medesimo, in cui questo secondo circuito sarà chiuso, si vedrà l'ago galvanometrico mettersi in moto ed indicare una corrente opposta a quella della pila: corrente di brevissima durata, imperocchè l'ago farà subito ritorno al suo meridiano, ed ivi resterà per tutto il tempo che starà chiuso il circuito voltaico. Ma tosto che ci faremo ad interromperlo, l' ago tornerà di belnuovo a mettersi in moto, ma per una via opposta alla prima. *Correnti indotte da correnti.*

Dunque in un circuito chiuso, prossimo ad un circuito vol-

taico, s'induce una corrente inversa nell' istante in cui il secondo circuito si chiude, ed una corrente diretta nel momento in cui si apre.

Non è necessario che i due fili conduttori, l'inducente e l'indotto, camminino nelle diverse spire, l'uno a fianco dell'altro; ma si potranno del primo far tutti gli ordini di spire ammissibili dalla sua lunghezza e dal diametro del rocchello, e ad esse poi soprapporre quelle del filo d' induzione. L'azione del primo filo sul secondo sarà massima, quando il prodotto del numero delle sue spire per la quantità di corrente che lo percorre sia più grande possibile; e come il secondo sarà più lungo e sottile, maggiori resistenze (conferme mente alla legge di Ohm) potrà vincere la corrente che vi si genera. Quindi si comprende come nell'apparecchio, denominato *rocchello di Rumkoff*, nel quale il filo d'induzione ha più chilometri di lunghezza, la corrente indotta possa vincere sì grandi resistenze da produrre scintille di sorprendente lunghezza ad ogni apertura del circuito.

Dallo stesso principio risulta ancora che l'effetto fisiologico delle correnti indotte può non esser proporzionale all' effetto galvanometrico. Vorszelmann de Heer compose una spirale d'induzione, nella quale il filo della corrente principale era lungo 90 piedi ed aveva il diametro di $\frac{1}{20}$ di pollice; il filo d'induzione poi doppio di $\frac{1}{50}$ di pollice era lungo 1500 piedi. La scossa che dava questo secondo filo riusciva intollerabile, mentre non faceva affatto deviare l'ago galvanometrico.

Nè dalla sola elettricità voltaica, ma da quella ancora delle ordinarie macchine elettriche si hanno delle correnti indotte. Avvicinando tra loro le due spirali piatte A e B (Fig. 283 *bis*) e facendo che per una di esse circoli la scarica di una boccia di Leyden, mentre i capi dell'altra mercè due cilindretti metallici siano chiusi tra le mani di un osservatore, questi proverà una scossa nell'istante in cui la boccia sarà scaricata.

Induzione successiva.

288. Nell'induzione elettrodinamica egualmente che nell'elettrostatica, il corpo che la riceve può a vicenda agire sopra un altro che gli sia vicino, e così l'azione inducente potrà suc-

cessivamente estendersi ad una serie di circuiti. Prendiamo ad esempio una delle sperienze fatte dal prof. Henry, che pel primo si è occupato di queste ricerche: *a,b,c,f* (Fig. 284) sono spirali piatte formate da un nastro di rame vestito di seta, *d* ed *e* due rocchetti di filo dello stesso metallo ed egualmente coperto di seta. Chiudendo colla spirale *a* il circuito di una pila, si avrà una corrente inversa nelle spirali *b* e *c*, una corrente diretta nei rocchetti *d* ed *e*, ed un'altra corrente inversa nella spirale *f*. Le quali correnti verranno dimostrate, sia chiudendo un galvanometro nella spirale che si vuol esaminare, sia provvedendola di una spirale magnetizzante simile a *g*. Correnti diametralmente opposte si avranno nell'istante in cui il circuito sarà interrotto.

La successiva induzione in più spirali produce una mutua reazione nociva all'effetto, quando essendo più di due si trovino l'una all'altra soprapposte. Così, se le tre spirali piatte ed eguali *a*, *b*, *c* (Fig. 285) siano poste l'una sull' altra e che facendo circolare per *a* la corrente di una pila, si osservi l'effetto galvanometrico nella spirale *b*, lo si troverà più o meno grande, secondochè la spirale *c* sarà aperta o chiusa. E ciò, perchè ciascuna delle spirali *b* e *c* tendendo, allorchè son chiuse, a produrre nell' altra una corrente inversa alla propria, fa che scemi l'effetto prodottovi dalla spirale *a*.

Questa mutua reazione delle spirali soprapposte ci fa comprendere e la necessità dei circuiti chiusi per la produzione delle correnti indotte, ed il perchè dell'azione che spiegano i diaframmi interposti alle spirali. Così Henry osservava che un diaframma isolante, messo fra la spirale attuante e l'attuata, non altera la quantità dell'induzione, ma che questa vien diminuita per l'interposizione di un diaframma di sostanza conduttrice, a meno che non vi fossero considerevoli interruzioni di continuità.

289. Faraday, annunziando nel 1831 la sua scoverta delle correnti indotte da correnti, diceva non rinvenire ragione, per la quale una corrente non dovesse attuarne un'altra nello stesso filo che essa percorre. La realtà di questo concetto fu tosto **Estracorrente.**

chiarita da Nobili ed Antinori, i quali congiunto che ebbero ai poli di una pila di pochi elementi i capi di un lungo filo di rame isolato e piegato ad elica, videro interrompendo il circuito, apparire scintille più vigorose di quelle che si avevano adoperando un filo più corto. I due fisici italiani opinarono che il fatto dipendesse soltanto dalla maggior lunghezza del filo; ma ciò è inammissibile. L'induzione è stata sorretta dalla mutua azione delle spire, e n'è pruova la seguente sperienza. Intorno al rocchello di legno BD (Fig. 281) sta girato in molte spire un lungo filo di rame vestito di seta, e di cui un capo è fermato ad uno degli elementi della coppia voltaica A, l'altro è ritenuto dalla vite *b*. L'altro elemento della coppia è congiunto alla vite *a*, la quale è in permanente comunicazione colla ruota dentata C, mentre la vite *b* essendovi unita mercè una lamina metallica che preme contro i denti della ruota, la comunicazione rimane interrotta ad ogni passaggio di dente. Stabilito così il circuito, s'impugnino i due manubrii *h* ed *l*, congiunti alle viti *a* e *b*, e si faccia girare la ruota: ad ogni interruzione del circolo voltaico, si avrà una scossa più o meno forte, evidentemente dovuta alla corrente indotta nella spirale al momento in cui il circuito si è aperto; e di ciò resteremo meglio convinti, quando i fili dei manubrii saranno fermati l'uno in *b* e l'altro in *c*, poichè allora la coppia giacerà fuori il circuito chiuso dal corpo dell'osservatore.

La corrente che l'azione voltaica induce nello stesso suo circuito al momento in cui si chiude o si apre, e che va distinta sotto il nome di *estracorrente*, è sottoposta alla stessa legge di quella indotta dall'azione voltaica in un circuito prossimo; vale a dire che essa è diretta quando il circuito si apre ed inversa quando si chiude. Questo fatto è stato messo fuor di dubbio da Edlung con un apparecchio, di cui la fig. 279 ne presenta l'idea. In *a* è una pila, i cui reofori in *b* e *c* si uniscono ai quattro fili *bh*,*bg*,*cf*,*ce*; i due fili *bh*,*cf* vanno congiunti in *f* ed *h* ai capi di un gomitolo moltiplicatore *fplih*, che racchiude un magnetometro, ed i fili *ce* e *bg* si attaccano similmente ai capi di un altro gomitolo moltiplicatore *emng* che circonda il primo. Dic-

tro questo ordinamento la corrente, che poniamo uscisse pel reoforo *ac*, si dividerà in *c* in due, le quali percorrendo, come indicano nella figura le frecce senza penne, i due gomitoli in opposte direzioni, produrranno opposti deviamenti nel magnetometro, che perciò si potrà facilmente conservare in equilibrio rendendo eguali quelle due azioni perturbatrici. E se dopo aver ottenuto questo equilibrio s'introduca nel filo *ce* la spirale S, sarà impossibile conservarlo senza introdurre nel circuito interno, e sia tra *f* ed *e*, un'egual resistenza; ed a fine di evitare un'induzione sulla spirale S, Edlung distendeva rettilineamente su due bastoncini di vetro distanti tra loro di due metri, il filo aggiunto al circuito interno perchè la sua azione sul galvanometro rimanesse eguale a quella dell'esterno. Messo sul reoforo *ac* un apparecchio con cui si possa interrompere e chiudere il circuito a piacere dell'osservatore, una corrente sarà indotta nella spirale S e percorrerà, come indicano le frecce con penne, nella stessa direzione i due circuiti. Il magnetometro ne sarà deviato, e dal suo movimento si potrà conoscere che nel caso d'interruzione la corrente indotta procede come si vede nella figura, vale a dire nello stesso senso della corrente principale, e che al momento in cui il circuito si chiude essa cammina in senso inverso.

290. Nel 1820 Arago scovriva che il filo congiuntivo di una pila attira le particelle di limatura di ferro, e che queste vi aderiscono ponendosi ad angolo retto colla direzione della corrente. Essendo già nota l'azione dei circuiti voltaici sulla direzione di un ago magnetico, l'ordinarsi delle particelle di limatura ad angolo retto colla direzione del filo dimostrava che la corrente le aveva magnetizzate. Quindi Arago ed Ampère poterono calamitare degli aghi di acciaio, adagiandoli dentro spirale di filo di rame vestito di seta, i cui estremi furono per un istante messi a contatto coi poli di una pila. Magnetismo indotto dalle correnti.

La polarità che in tal modo il ferro acquista, varia di posizione secondo la direzione delle spire e quella corrente, rendendo però soddisfatta la norma indicata nel n°, e che si deve ad Ampère. Quindi se la spira muove da sinistra a destra, il

polo nord si svolgerà nel luogo prossimo a quello in cui la corrente esce dalla spirale, e starà viceversa prossimo al punto d'immissione, quando la spira procederà da destra a sinistra.

Il metodo dello strofinio produceva talvolta, in mezzo alla verga da calamitarsi, delle polarità secondarie conosciute sotto il nome di *punti conseguenti*, e per le quali non di rado avveniva che negli estremi della verga risedessero poli omonimi. A cansare questo grave inconveniente, furono escogitati i diversi modi di strofinio indicati nel n° 254. Nulla di ciò è da temersi adoperando la magnetizzazione elettrica; che anzi quei punti si potranno a bella posta sviluppare, qualora in qualche punto della spirale s'inverta il movimento del filo, stante che ivi si avrà una polarità secondaria.

Nè solamente coll'elettricità voltaica, ma con quella eziandio di un'ordinaria macchina elettrica si possono calamitare degli aghi di acciaio. A tal uopo si porranno in un cannello di legno o di vetro, intorno al quale sia avvolto a spira un filo di rame ben isolato: facendo passare pel filo la scarica di una boccia di Leyden, gli aghi rimarranno tutti calamitati e col polo nord alla sinistra della corrente.

Il metodo della magnetizzazione elettrica è stato applicato dal prof. Elias d'Harlem per fortemente calamitare delle grandi verghe di acciaio. Egli formava con molti giri di un filo di rame vestito di seta una specie di anello più grande della verga da calamitarsi ed assai doppio: congiunti i capi estremi del filo coi poli di una pila, vi introduceva la verga e ve la faceva scorrere a più riprese da un estremo all'altro; avvertendo però di non estrarla, se non dopo aver interrotto il circuito e nel momento in cui l'anello si trovava giusto nel mezzo della verga. Con questo metodo, quando la lunghezza ed il diametro del filo sieno in giusta ragione colla forza della pila, si hanno calamite assai più vigorose di quelle che si potevano ottenere col processo di Duhamel e Mitchell, che d'altronde riusciva assai laborioso, quando non si aveva, ciò che precisamente si andava cercando, una sbarra fortemente calamitata.

Oltre a delle forti calamite permanenti la magnetizzazione

elettrica ci dà delle calamite temporanee, o *elettrocalamite*, di una forza incomparabilmente più grande. Queste calamite consistono in cilindri di ferro dolce, intorno a cui è avvolto in più ordini di spire un filo di rame vestito di seta; e sieno i cilindri accoppiati come nella fig. 278, o formino le due branche di un solo cilindro voltato a ferro di cavallo, bisognerà sempre che l'andamento della spira s' inverta nel passaggio del filo da un cilindro all'altro, affinchè i due poli eteronimi si presentino nelle estremità libere dei cilindri.

La forza di queste calamite è grande, finchè il filo che le circonda è percorso dalla corrente elettrica; ma appena che questa cessa e che l'àncora n'è staccata, sparisce immediatamente ogni traccia di magnetismo, e ciò per la natura stessa del ferro dolce, che acquista e perde con eguale facilità la virtù magnetica.

Nuovi fatti sulle relazioni del magnetismo coll'ordinamento molecolare delle calamite si sono scoperti mercè il metodo della magnetizzazione elettrica. Era noto che l' acciaio per mezzo di una tempera più forte acquista la capacità di prendere una maggior forza magnetica. Or questa dipendenza del grado di magnetismo dalla maggiore stabilità molecolare dell'acciaio più fortemente temperato è messa in chiaro dal seguente fatto osservato da Guillemin. Questi avvolta che ebbe una spirale di filo di rame vestito di seta intorno ad una verga di ferro dolce, abbastanza lunga per essere flessibile, fissò la verga orizzontalmente per uno degli estremi, e gravò l'altro di un peso sufficiente a darle una sensibile flessione. Immettendo a più riprese una corrente per la spirale di rame, egli vide ad ogni volta la verga raddrizzarsi, indi tornare alla prima inflessione tosto che la corrente cessava—Con un apparecchio simile al pirometro di Muschenbroeck, Joule ha trovato che le verghe di ferro e di acciaio circondate dalle solite spirali, si allungano alquanto sotto l'azione della corrente elettrica, e che questo allungamento avviene con diminuzione della doppiezza, imperocchè le verghe chiuse in tubi pieni di acqua non hanno mostrato alcun aumento di volume. Lo stesso fisi-

co ha trovato ancora che fili e verghe sì di ferro che di acciaio, allungate meccanicamente con pesi più grandi di 740 libbre, presentano un sensibile accorciamento nell'atto che prendono un forte magnetismo. Ma tanto l'accrescimento che la diminuzione della lunghezza cessano almeno in parte di aver luogo nel ferro dolce, tosto che svanisce il suo temporaneo magnetismo.

Or se questo nuovo ordinamento che il magnetismo produce nelle verghe di ferro, sia a brevissimi intervalli eccitato ed estinto, le verghe potranno concepire delle vibrazioni longitudinali capaci di suoni musicali. E ciò appunto osservava il Page per la prima volta nel 1837: egli trovava che avvicinando uno o i due poli di una vigorosa calamita ad una spirale piatta, ne avveniva un suono ogni volta che il circuito elettrico era stabilito od interrotto. Questo fatto fu poi studiato da De la Rive, Wertheim ecc; ed a volerlo facilmente riprodurre, basterà fissare verticalmente una bacchetta di ferro circondata da spirale di rame, e per mezzo di un *reotomo* (interruttore di corrente) situato in luogo lontano dall'osservatore, stabilire ed interrompere il circuito una trentina di volte a secondo.

Correnti indotte dalle calamite.

291. Se l'elettricità in movimento induce magnetismo nelle sostanze capaci di acquistarlo, viceversa l'azione dei corpi magnetizzati può eccitare una corrente elettrica nelle spirali metalliche. È questa una scoverta a cui Faraday pervenne condotto dal principio della reazione eguale ed opposta all'azione.

Si congiungano i due capi del filo di un elettromagnete (Fig. 279) con quelli di un galvanometro, ed alle basi dell'elettromagnete si avvicinino quelle di una calamita permanente foggiata a ferro di cavallo; si vedrà l'ago galvanometrico indicare una corrente *inversa*, vale a dire opposta a quella che avrebbe dovuta girare nelle spire dell'elettromagnete per indurvi quella stessa polarità che vi produce la presenza della calamita permanente. E se dopo che questa è giunta a toccare la prima e che l'ago del galvanometro è tornato al suo zero (stante che

la corrente indotta nella spirale è di brevissima durata)si allontani l'una calamita dall'altra, l'ago tornerà a mettersi in moto, ma indicherà una corrente diretta. Quindi si comprende perchè dei cilindri di ferro dolce, o meglio dei fasci di filo di ferro, introdotti nelle spirali d'induzione (Fig. 281) rendano più vigorosa la scossa che si riceve al momento in cui s'interrompe il circuito: è il magnetismo evanescente che allora produce nella spirale una corrente diretta nel medesimo senso di quella che v'induce la corrente primitiva.

Per brevità diciamo *primaria* la corrente che percorrendo le due spirali A' e B' (Fig. 283) produrrebbe nelle corrispondenti branche del cilindro di ferro dolce quelle stesse polarità magnetiche che mediante l'azione variabile dei suoi poli A e B v'induce la calamita permanente. Or immaginiamo che una delle due calamite, e sia la temporanea, fosse girevole intorno al suo asse di figura xy: nel 1° quarto di giro le due branche del cilindro di ferro dolce, allontanandosi dai poli A e B, avranno un magnetismo decrescente, ed indurranno nel sistema delle due spirali, di cui supponiamo congiunti i capi estremi, una corrente diretta egualmente che dovrebbe esser la primaria — Cominciando il 2° quarto di giro le polarità magnetiche prenderanno ad invertirsi nella calamita temporanea; la corrente primaria dovrebbe invertirsi del pari, e poichè contraria a questa dev'esser quella indotta dalle nuove polarità crescenti del ferro dolce, così la corrente generata nel 2° quarto di giro non sarà che la continuazione di quella prodotta nel 1°. Laonde per tutto il 1° semigiro una corrente sempre diretta nel medesimo senso della primaria percorrerà il sistema delle due spirali — Al cominciare del 2° semigiro le nuove polarità indotte nel ferro dolce principieranno ad invertirsi, quindi daranno origine ad una corrente inversa a quella prodotta nel 1° semigiro, e che poi s'invertirà di nuovo al cominciar del 3°, e così di seguito.

La corrente dunque indotta nelle spirali, cominciando da 0°, avrà una prima inversione a 180°, una seconda a 360°, e così di seguito; in conseguenza la sua energia sarà massima a

90°,270°, ecc. Or se in ciascuno degl'istanti in cui avvengono questi massimi, il circuito fosse interrotto e tosto ristabilito, una scintilla scoccherebbe nel punto d'interruzione; e se mentre il circuito s'interrompe, il corpo dell'osservatore lo ristabilisse, egli sarebbe scosso dall'azione congiunta della corrente primitiva e dell'estracorrente generata in quell'istante.

Poniamo inoltre che in mezzo al circuito stesse un voltametro e che ad ogni semigiro si mutassero i suoi punti di congiunzione coi capi delle spirali, quel voltametro sarebbe percorso da una corrente diretta sempre per un medesimo verso, ed in conseguenza si avrebbe sempre ossigeno da uno dei fili di platino ed idrogeno dall'altro; e se in vece del voltametro ivi si trovasse un filo di platino assai corto e sottile, ne sarebbe arroventato.

Macchina di Clarke.

292. Tutte le supposizioni fatte verso la fine del n° precedente, si trovano tutte più o meno acconciamente effettuite nelle così dette *macchine magneto-elettriche*, tra le quali prescegliamo quella di Clarke, che si vede nella fig. 280. Si compone di una calamita permanente A a ferro di cavallo, innanzi ai poli della quale per mezzo di rotazione comunicata all'asse *h* dalla ruota B girano due calamite temporanee fermate alla traversa C. Di queste calamite, denominate *armature*, se ne ha due coppie; l'una porta una spirale di filo più corto e più doppio, e si denomina *armatura di quantità* [1], l'altra che dicesi *armatura di tensione* è circondata da filo più lungo e più sottile: serve la prima per l'ignizione dei fili metallici e per la produzione di moderate scosse, la seconda per gli effetti chimici e le scosse vigorose. Qualunque delle armature si adatti all'asse *h*, la sua costruzione è tale, che uno dei capi del filo comunicherà sempre collo stesso asse, e l'altro colla ghiera *i* che circondando l'asse non vi ha comunicazione. Si osserva inoltre nella parte anteriore della figura il sostegno *k*, che porta

[1] La distinzione di *quantità* e *tensione*, stabilita anteriormente alla dottrina di Ohm, è del tutto falsa. La diversità di lunghezza e diametro nei fili delle due armature è unicamente richiesta dalla necessità di proporzionare la resistenza da vincersi a quella dell'elettromotore che è la stessa spirale.

le due laminette metalliche *m* ed *n* ; un filo anche metallico *t* può farle tra loro comunicare, ed allora la molla *x* premendo la ghiera *i* ed il filo *y* toccando l'asse *h*, il circuito sarà chiuso: un pezzo aggiunto allo stesso asse lo interrompe ad ogni mezzo giro, un altro denominato *commutatore* fa che la corrente possa andar sempre per un medesimo verso.

293. Intorno ad un cilindro di cartone, di diametro a sufficienza grande, avvolgasi ad elica un lungo filo di rame vestito di seta, di cui si congiungano i capi estremi con quelli di un sensibile galvanometro; indi posto che sia l'asse del cilindro parallelamente all'ago d'inclinazione, lo si faccia celeramente rotare di 180° nel piano del meridiano magnetico: allora si vedrà l'ago galvanometrico indicare la presenza di una corrente, che simile a quella indotta da una calamita, avrà brevissima durata. **Corrente indotta dal magnetismo terrestre.**

Questa nuova sorgente d'induzione fu scoperta da Faraday; indi in Italia fu studiata da Nobili ed Antinori a Firenze, e dal prof. Ab. Fazzini a Napoli. Ma le ricerche istituite da questi fisici italiani non menarono ad altro che ad ottenere più spiccate deviazioni galvanometriche. Più tardi i prof. Palmieri e Linari pervennero ad accrescere la forza di simili correnti in modo da ottenerne la scossa, la scomposizione dell'acqua e la scintilla; ed ebbero questi effetti per mezzo della *batteria magneto-elettro-tellurica* da essi inventata. La quale consisteva in un telaio di legno (Fig. 282) su cui otto cilindri voti di ferro dolce, lunghi $0^m,6$, stavano fermati in modo da giacere coi loro punti medii sull'asse del telaio; ciascuno dei cilindri per $\frac{2}{3}$ della sua lunghezza era coverto da più ordini di spire fatte con filo di rame vestito di seta, i cui capi estremi andavano congiunti a quelli delle altre spire, or in modo da formare un solo filo identicamente avvolto intorno alla serie dei cilindri, or un filo che avesse un'area di sezione tante volte più grande, per quanti erano i cilindri; e ciò a norma delle resistenze che la corrente doveva vincere. Situato l'asse del telaio perpendicolarmente al meridiano magnetico, ed il suo piano reso parallelo all'ago d'inclinazione, bastava girarlo di 180° perchè

l'ago galvanometrico facesse più giri; e la scossa, la scomposizione dell'acqua e la scintilla si avevano collo stesso meccanismo adoperato nella macchina di Clarke.

A dir vero gli effetti della suddetta batteria non erano prodotti che dal magnetismo indotto dall'azione terrestre su i cilindri di ferro dolce, e reso variabile dal moto di rotazione. Ma il prof. Palmieri non tardò ad ottenere gli stessi fenomeni come effetti immediati dell'induzione terrestre, mercè una spirale fatta intorno ad un telaio di forma ellittica, il cui asse maggiore, che era in pari tempo asse di rotazione, aveva la lunghezza di $1^m,3$, ed il minore quella di $0^m,8$.

Inclinatorio di Weber.

294. L' induzione magneto-elettro-tellurica è stata felicemente applicata da Weber all'esatta determinazione dell'inclinazione magnetica. L' *inclinatorio d'induzione* (Fig. 286) da lui all'uopo inventato, si compone di una ruota *a* fatta di 16 lamine di rame tagliate ad anelli circolari, delle quali 8 sono da un lato e 8 dall'altro di uno spazio che le separa. La ruota è girevole intorno ad uno dei suoi diametri, che a destra è scavato per ricevere un asse che porta la bussola *b*, ed a sinistra si unisce al rocchetto *r* che ingrana colla ruota dentata r', alla quale si dà moto per mezzo della manivella *k*.

Situato l'apparecchio col suo asse di rotazione nel piano del meridiano magnetico e dato moto alla ruota *a*, si vedrà l'ago deviare dal suo meridiano per un angolo proporzionale alla celerità di rotazione. Questo deviamento è dovuto all' azione della corrente indotta negli anelli della ruota dalla componente verticale del magnetismo terrestre, la sola che riesca variamente inclinata e quindi variamente efficace su gli anelli nelle loro diverse posizioni. Chiamando M l'energia magnetica dell'ago e T la suddetta componente del magnetismo terrestre, la forza con cui la corrente indotta nel sistema degli anelli tende a deviar l'ago dal suo meridiano, sarà proporzionale a MT, e potrà in conseguenza esser rappresentata da aMT, a indicando un numero costante. Or indicando con v l' angolo di deviamento dell'ago per una certa celerità di rotazione della macchina, la componente $a\mathrm{MT}\cos v$ della stessa forza, presa

normalmente all'ago, dovrà fare equilibrio alla forza MT'sen$v$, con cui la componente orizzontale T' del magnetismo terrestre tende a ricondurre lo stesso ago nel suo meridiano. Quindi l'equazione:

$$a\text{MT}\cos v = \text{MT}'\text{sen}\, v\ ,\quad \text{donde}\quad \text{tg}\, v = \frac{a\text{T}}{\text{T}'} = a\,\text{tg}\, i\ ,$$

essendo che $\frac{\text{T}}{\text{T}'}$ è la tangente dell'angolo d'inclinazione i del magnetismo nel luogo dell'esperimento. Or ponendo $a = \frac{1}{b}$, dall'ultima delle due equazioni precedenti risulta:

$$\text{tg}\, i = b\,\text{tg}\, v\ ,$$

per mezzo della quale si potrà dedurre il valore di i da quello di v, quando sia nota la costante b. La quale potrà definirsi sperimentando primieramente in un luogo pel quale il valore di i sia esattamente conosciuto; ed avvertendo poi a dar sempre all'apparecchio la velocità che quivi ha ottenuta.

CAPO DODICESIMO.

TEORIA DEL MAGNETISMO.

295. AB,CD (Fig. 250) rappresentano due vasi annulari di rame contenenti acqua acidulata; il primo sta sopra una base circolare di legno, dal centro della quale si eleva una colonna che serve di sostegno all'altro. Secondo l' asse della colonna corre il filo metallico *s*, che finisce nella piccola coppa *z*, destinata a ricevere una punta metallica intorno alla quale è girevole la bacchetta *mn* di sostanza isolante. Il filo di rame *k* mette in comunicazione l'acqua acidulata di AB con quella di CD, e questa comunica col filo *s* mercè le laminette metalliche *t*; in fine il contrappeso *p* serve a tenere la bacchetta *mn* in equilibrio. Congiungendo uno dei reofori di una pi-

Azione della terra su i conduttori delle correnti.

la all'estremità inferiore del filo s ed immergendo l'altro nell'acqua acidulata del vase AB, la corrente elettrica passerà pel filo k, e questo si vedrà da se medesimo dirigersi a levante od a ponente ed ivi fermarsi dopo alquante oscillazioni, secondochè la corrente scenderà o salirà per esso. Laonde:

Un conduttore verticale, mobile intorno ad asse verticale, si dirigerà da se stesso a levante se la corrente vi è discendente, ed a ponente se ascendente.

L'apparecchio qui descritto è invenzione di Pouillet; il fenomeno che serve a riprodurre è stato scoverto da De la Rive, che lo dimostrò per mezzo del suo *anello galleggiante*. Il quale (Fig. 251) si compone di più giri di filo di rame vestito di seta, saldato nei capi estremi a due lamine z ed r, la prima di zinco l'altra di rame, infitte ad una tavoletta di sughero perchè l'anello potesse galleggiare su dell'acqua acidulata. Così facendo vi si eccita una corrente la quale dirige l'anello in modo che l'arco prossimo allo zinco si volge a levante ed a ponente quello prossimo al rame.

Il fatto di cui parliamo, può riprodursi ancora per mezzo del cilindro galleggiante rappresentato dalla fig. 252. Non è che un cannello di legno intorno al quale è avvolto a spira un filo di rame vestito di seta, e che finisce nelle due laminette componenti la coppia voltaica. Soprapponendo il cannello ad una tavoletta di sughero o meglio ad una piccola conca di legno, e facendolo così galleggiare sull'acqua acidulata, lo si vedrà dirigere il suo asse parallelamente all'ago di declinazione, volgendo a levante il lato della spira pel quale la corrente discende, ed a ponente il lato opposto.

Un movimento ancora si osserva nei conduttori orizzontali che mobili parallelamente a loro stessi si trovino giacere perpendicolarmente al meridiano magnetico. A tal uopo si pongano paralleli allo stesso meridiano e l'uno a fianco dell'altro due canaletti di latta, lunghi ciascuno un mezzo metro e perfettamente isolati; si empiano di acqua acidulata, e si facciano tra loro comunicare le due masse liquide per mezzo di un filo di rame, i cui estremi voltati ad angolo retto sieno ficcati in

due tavolette di sughero che lo rendono galleggiante sull'acqua dei canaletti. Questi allora si pongano in comunicazione coi due poli di una pila, e si vedrà il filo muoversi verso il sud o verso il nord, secondo che la corrente lo percorrerà da levante a ponente o viceversa.

296. Al contrappeso *p* (Fig. 250) sostituiscasi un filo di rame, il quale egualmente che il filo *k* faccia comunicare tra loro i due recipienti AB e CD. La corrente diverrà così nel tempo stesso ascendente o discendente pei due fili, e questi per le loro opposte tendenze di recarsi tutte due verso est od ovest, formeranno un sistema astatico che resterà in equilibrio in qualunque azzimutto. Allora si avvicini ad uno di quei fili e parallelamente un conduttore rettilineo, e si vedrà quel filo venirne attratto o ripulso, secondo che le correnti nei due conduttori avranno la stessa od opposta direzione. Dunque: Azione mutua dei conduttori.

I conduttori paralleli si attraggono quando le correnti vi procedono per lo stesso verso, e si ripellono quando vi hanno direzioni opposte.

Queste attrazioni e ripulsioni avvengono ancora sotto le medesime condizioni tra conduttori inclinati tra loro, come si rileva dal seguente sperimento. Sopra una base di legno (Fig. 255) sia scolpito un canaletto circolare *mn*, interrotto diametralmente dai due setti isolanti *a* e *b*: sul centro della base si elevi un asse intorno al quale sia mobile con dolce strofinio il conduttore *rs*, e sulla punta dell'asse poggi in bilico, come un ago di bussola, il conduttore *ce*; e gli estremi di questi conduttori sieno punte di ferro impiantate ad angolo retto, affinchè possano pescare nei due canaletti pieni di mercurio. Or facendo comunicare il mercurio contenuto nel canaletto *n* col polo positivo di una pila, e quello di *m* col negativo, i conduttori saranno percorsi dalla corrente come viene indicato dalle frecce, ed allora si vedrà il conduttore *ce* girare intorno al suo asse fino a portare l'estremo *c* su *s*, ed *e* su *r*, qualunque sia stata la sua prima posizione rispetto all'altro conduttore. Dunque:

I conduttori incrociati si attraggono quando le correnti vi

procedano sia concorrendo al vertice dell'angolo da essi formato, sia partendone in pari tempo; ma se una delle correnti movesse verso il vertice dell'angolo, mentre l'altra se ne allontana, i due conduttori si ripellerebbero.

Segue da questa legge che se una corrente in un conduttore indefinito *ab* (Fig. 256) proceda da *a* verso *b*, la sua azione sul conduttore finito *ed* sarà attrattiva nell'angolo *bmc*, e ripulsiva in *amb*; vi sarà dunque una risultante che spingerà il conduttore *ed* parallelamente a se stesso da *a* verso *b*. E questo movimento diverrà una rotazione continua, quando fatto *ed* mobile intorno al punto *c*, gli si faccia girare intorno il conduttore *ab* con una spira circolare. Così avviene nell'apparecchio indicato nella fig. 257. Un vase cilindrico *v* di rame è circondato da un spirale fatta da una lamina dello stesso metallo coverta di seta in tutta la sua lunghezza, e che mette capo ai due punti *a* e *c*: in mezzo al vase si eleva la colonnetta *e* che sostiene il conduttore mobile *g*, ed ha comunicazione metallica con *b*, mentre un'altra ve ne ha tra il fondo del vase ed il punto *d*. Stabilita che sia una congiunzione metallica di *b* con *c*, pongasi uno dei reofori della pila, e sia il positivo, in *a* e l'altro in *d*: la corrente immettendosi per *a* percorrerà tutte le spire del nastro avvolto al vase *v*, indi uscirà da *c*, donde passando in *b* andrà pel sostegno *e*, e quindi pel conduttore mobile scenderà nell'acqua acidulata contenuta in *v*, da questo in *d*, donde farà ritorno alla pila. Considerando le attrazioni e ripulsioni che avvengono negli angoli che i fili verticali del conduttore mobile fanno colla direzione della spira, si troverà che quel conduttore dovrà girare da sinistra a destra.

Corrente terrestre.

297. È noto che i conduttori paralleli si attraggono, quando le correnti elettriche li percorrono per un medesimo verso, e si ripellono se le correnti vi procedono in senso opposto. È noto ancora che i conduttori orizzontali, diretti perpendicolarmente al meridiano magnetico, sono attratti verso il sud o spinti verso il nord, secondochè la corrente in essi procede da est ad ovest o viceversa. Or se poniamo il principio che un conduttore di corrente non possa essere attratto o ripulso che

da un altro conduttore di corrente, la spinta verso il sud o verso il nord che ricevono quelli che si trovano giacere perpendicolarmente al meridiano magnetico, diverrà una pruova che realmente vi sia intorno al nostro globo una corrente elettrica che ne percorra la superficie da est ad ovest lungo l' equatore magnetico, ovvero che più correnti dirette per quel medesimo verso diano una risultante nel piano del suddetto equatore.

Ed a rifermare questo concetto giova il seguente sperimento. Tolte via le due lamine *t* (Fig. 250) pongasi in vece della leva *mn* il conduttore *ab* (Fig. 253) che si farà pescare nell'acqua acidulata del vase CD (Fig. 250) per mezzo della zona annulare da cui è terminato. Se la corrente sale per la colonna S, giunta che sarà alla punta che sostiene il conduttore, essa si dividerà in due che cammineranno per *ca* e *cb*, ed allora il conduttore comincerà a girare da destra a sinistra. Considerando nel suo piano il circolo descritto da *ab* (Fig. 254) poniamo che la sua giacitura iniziale sia normale al piano del meridiano magnetico; allora la corrente che va per *cb* spingerà questo braccio del conduttore verso il nord perchè diretta ad est, mentre il braccio *ac*, in cui la corrente va ad ovest, è spinto verso il sud. Così *ab* passerà in *a'b'*, e giungerà a prendere una posizione normale alla prima, e nella quale rimarrebbe equilibrato, se non vi pervenisse con una velocità acquistata. Quindi passerà in *a''b''*, ed è facile comprendere come dopo aver superato quel primo luogo di riposo il filo debba continuamente rotare.

298. Dal principio che le correnti parallele si attraggono se procedono per lo stesso verso, e si ripellono allorchè vanno per direzioni opposte, segue che, piegando in due rami paralleli un conduttore rettilineo (Fig. 258), la sua azione, come il fatto riferma, dev'esser nulla sul conduttore *k* (Fig. 250), stante che l'attrazione di un ramo equilibra la ripulsione dell'altro. E poichè lo stesso effetto si ottiene dal conduttore rappresentato dalla fig. 259, è chiaro che l'azione di un conduttore sinuoso debba pareggiare quella di un conduttore rettilineo compreso tra gli stessi limiti. Cilindri elettro-dinamici.

Questo risultamento ci apre la via a poter dichiarare i fenomeni prodotti dai cilindri *elettrodinamici*. I quali si compongono con filo di rame vestito di seta, che dopo aver fatto molte spire intorno ad un medesimo asse ritorna in forma rettilinea al punto donde è partito: la fig. 260 rappresenta un cilindro di questa specie, e che porta ripiegati nel mezzo della sua lunghezza i capi estremi del filo, terminati nelle punte di acciaio *a* e *c*. Allorchè la corrente ne invade le spire, la sua azione nelle due metà dell'asse del cilindro risulta eguale ed opposta, in conseguenza non restano efficaci che le sole correnti circolari normali all'asse.

Per conciliare la mobilità del cilindro intorno ad un asse verticale colla continuità della corrente che ne deve percorrere le spire, fa d'uopo sospenderlo introducendo le punte *a* e *c* nelle coppette *r* ed *s* (Fig. 261) piene di mercurio e sostenute dalle colonne metalliche *a* e *b* le quali sono in comunicazione con due viti di pressione situate in *m* ed *n*.

Fermati che sieno a queste due viti i reofori di una pila, si vedrà il cilindro elettrodinamico dirigersi non altrimenti che farebbe il cilindro galleggiante, vale a dire che si porrà coll'asse nel piano del meridiano magnetico, volgendo ad est il lato della spira pel quale la corrente discende. E se il cilindro sia reso mobile intorno ad un asse orizzontale condotto pel suo centro di gravità, si vedrà nel suo estremo boreale inclinarsi verso il suolo non altrimenti che fa l'ago magnetico in una bussola d'inclinazione.

Se dopo aver determinate le estremità boreale ed australe di un secondo cilindro elettrodinamico, avviciniamo ciascuna di esse all'omonima del cilindro liberamente sospeso mercè l'apparecchio indicato nella fig. 261, vedremo quelle estremità ripellersi a vicenda, ed attrarsi in vece le eteronime. Le quali attrazioni e ripulsioni dipendono dall'esservi le correnti dirette per un medesimo verso o in senso opposto, come facilmente ci convinceremo avendo in mano due cilindri di legno, che simili a quello della fig. 289, portino segnata con frecce la via della corrente elettrica — Sostituendo al secondo cilin-

dro elettrodinamico una verghetta magnetica, si avranno identiche attrazioni e ripulsioni.

299. Per rendersi ragione della magnetizzazione dei corpi che ne sono capaci, e dello sviluppo delle forze attrattive e ripulsive che ne risulta, si è immaginata l'esistenza di due *fluidi magnetici*, l'uno *boreale*, l'altro *australe*, le cui molecole a vicenda si ripellono, mentre attraggono quelle dell'altro. I due fluidi si suppongono combinati e quindi a vicenda neutralizzati in ogni corpo capace di virtù magnetica; ed i varii metodi di calamitare non sono che mezzi di separarli. Teoria di Ampère.

Conosciuta la perfetta analogia delle calamite coi cilindri elettrodinamici, Ampère pensò sostituire all'ipotesi dei due fluidi magnetici quella di un sistema di correnti elettriche, circolanti intorno alle molecole di una calamità, tutte per un medesimo verso, e che danno un effetto risultante simile a quello di un cilindro elettrodinamico. Quindi ogni calamita si è riguardata come una *solenoide* (a modo di cilindro) nella quale le correnti son tutte parallele, e procedono discendenti sul lato orientale della calamita, vanno da est ad ovest sulla faccia inferiore, ascendono pel lato occidentale, ed in fine si dirigono da ovest ad est sulla faccia superiore. Considerando ad un tempo le leggi delle attrazioni e ripulsioni delle correnti parallele o incrociate, il modo con cui un ago magnetico è deviato dal suo meridiano per l'azione di una corrente parallela alla congiungente dei suoi poli, ed infine l'azione della terra sulle correnti dirette nella linea est-ovest, ne viene per necessaria conseguenza che se ogni calamita è una solenoide, il sistema delle correnti parallele vi dev'esser diretto nel modo suindicato. E questo concetto oltre ad essere una conseguenza necessaria della perfetta analogia delle calamite coi cilindri elettrodinamici, è solidamente rifermato dai fatti che seguono.

— 1° Supponiamo l'anello galleggiante di De la Rive già equilibrato sotto l'azione del magnetismo terrestre, e che l'osservatore dal lato meridionale spinga innanzi secondo l'asse dell'anello il polo australe di una verga magnetica; si vedrà Anello galleggiante e calamita.

l'anello far un mezzo giro sopra se stesso, indi correre verso la verga, circuirla e dopo alquante oscillazioni arrestarsi nel mezzo dell'intervallo polare. Quivi l'anello avrà stabile equilibrio, imperocchè movendo la verga nel senso della sua lunghezza, lo si vedrà seguirla dappresso. E se in vece del polo australe l'osservatore avesse similmente adoperato il polo boreale della verga, l'anello le sarebbe corso incontro movendosi parallelamente a se stesso, e l'avrebbe circuita come nel primo caso.

È abbastanza manifesta la relazione che questi fatti hanno col concetto ampериано sulla natura delle calamite, perchè sia d'uopo dichiararla.

Rotazione di un conduttore intorno ad una calamita. — 2° L'apparecchio rappresentato dalla fig. 257 ci ha dimostrato che un conduttore definito prende un moto di rotazione continua sotto l'azione di una corrente circolare il cui piano sia normale alla direzione del conduttore. Or se una calamita non è che una solenoide, un conduttore verticale che sia mobile intorno al polo boreale di una verga magnetica verticalmente situata, dovrà girare da sinistra a destra o viceversa, secondochè la corrente sarà ascendente o discendente: intorno al polo australe la rotazione prenderebbe opposta direzione. Un apparecchio semplicissimo, inventato da Faraday, ha confermato questo risultamento della teoria. Sul vase annulare *vv'* (Fig. 262) di zinco sta saldata l'asta di rame *ce*, che termina superiormente in una piccola coppa piena di mercurio, e destinata a ricevere una punta di acciaio su cui poggia il conduttore *mm'*: empito il vase di acqua acidulata, l'elettricità svolta dalla coppia rame-zinco si metterà in moto salendo pel conduttore *mm'* e discendendo per l'asta *ce*. Or se allora introducasi nel vano dell'anello formato dal vase il polo boreale della verga magnetica *ab* o l'australe, si vedrà il conduttore *mm'* girare da sinistra a destra nel primo caso e da destra a sinistra nel secondo.

Rotazione di una calamita intorno ad un conduttore. — 3° Ponendo in vece che il conduttore sia fisso e la calamita mobile, questa prenderà un moto di rotazione, che vieppiù riferma il concetto ampериано; e l'esperimento può

esser ordinato, sia a produrre una rotazione della calamita intorno al suo asse polare, sia ad ottenere un moto di rivoluzione della calamita intorno al conduttore. L'apparecchio rappresentato dalla fig. 263 serve all'uno ed all'altro modo di sperimentare; *a* è un vase di vètro pieno di mercurio, sul quale galleggia la calamita *b*, gravata inferiormente di una massa di platino, affinchè reggesse verticalmente; la calamita porta superiormente una piccola coppa piena di mercurio, destinato a ricevere il conduttore *e* congiunto ad un polo della pila, l'altro polo essendo unito al conduttore *c*, il quale è congiunto al mercurio del vase *a* per mezzo di un anello metallico, affinchè la trasmissione della corrente alla calamita sia simmetrica rispetto a tutti i piani condotti per l'asse polare. Chiuso il circuito tra l'apparecchio e la pila, la calamita comincerà a rotare intorno al suo asse, e raggiungerà bentosto una considerevole celerità — Volendo poi la rivoluzione della calamita intorno al conduttore, fa d'uopo che questo sia fermato secondo l'asse del recipiente e che la calamita galleggi liberamente sul mercurio tra la parete interna del recipiente ed il suddetto conduttore.

Or per vedere come questi fenomeni dipendano dalla teoria amperiana a modo di conseguenze, immaginiamo che nel caso di rotazione intorno all' asse della calamita rappresenti *mn* (Fig. 264) una sezione orizzontale del recipiente, *bd* quella della calamita, ed *e* quella del conduttore. Ponendo che la calamita abbia il polo boreale in alto, la corrente nella solenoide, che essa rappresenta, dovrà esser diretta come indicano le frecce segnate dentro al cerchio *abcd*; e se il conduttore sia in congiunzione col polo positivo della pila, la corrente passerà dalla calamita al mercurio sotto forma di raggi che muovono dal centro alla circonferenza del cerchio *mn*, e considerandovi quello che vi è segnato, è chiaro che per l'azione reciproca tra la corrente della calamita e quella del conduttore vi sarà ripulsione nell'angolo *sad* ed attrazione nell'angolo *sab*; il raggio *es* dovrà quindi rotare apparentemente da destra a sinistra, ed in conseguenza la calamita dovrà realmente girare

da sinistra a destra, come dicono le due frecce esterne al circolo *abcd*. Se poi il conduttore *e* comunicasse col polo negativo della pila, la calamita roterebbe da destra a sinistra.

Rispetto poi all'altro modo di rotazione, consideriamo ancora il giuoco delle forze attrattive e ripulsive in una sezione normale all'asse del recipiente. Condotta la *cd* (Fig. 265) pei centri delle sezioni sì del conduttore che della calamita, avremo in essa una linea di simmetria rispetto all' azione delle forze; e supponendo che la corrente voltiana proceda dal conduttore al mercurio e che il polo superiore della calamità galleggiante sia il boreale, vi sarà, tra la corrente trasmessa e quella della calamita, attrazione a destra e ripulsione a sinistra di *cd*. Or la legge di simmetria a cui soggiacciono le mutue azioni delle due correnti, richiede non solo che la risultante *as* delle forze attrattive pareggi la *as'* delle forze ripulsive, ma che queste due risultanti facciano ancora angoli eguali colla *ar* normale al raggio *cd*. Secondo questa normale andrà dunque diretta la risultante finale e quindi l' impulso che ne riceve la calamita galleggiante. Ma come questa si muove, così varia la posizione di *cd* e quella della sua normale, e se considereremo ancora che le velocità acquistate dalla calamita in virtù degl' impulsi successivi sono distrutte dalla forte resistenza del mezzo, vedremo chiaramente che la calamita dovrà descrivere intorno al conduttore fisso una superficie cilindrica a base circolare, come il fatto dimostra.

Volendo attuare le due specie di rotazione di una calamita mercè l'apparecchio della fig. 263, oltre alla difficoltà di armare la calamita con una massa di platino, vi è quella di dover usare di una forte pila, specialmente per produrre il moto di rivoluzione intorno al conduttore. Queste difficoltà più non s'incontrano quando si faccia uso degli apparecchi indicati nelle fig. 290, e 290 *a*. Sopra una base di legno si elevano (fig. 290) due colonnette di ottone, *s* ed *l*, la prima delle quali termina superiormente in una piccola coppa piena di mercurio; l'altra porta due bracci orizzontali, che vi stanno fermati per mezzo di viti di pressione. Dal braccio superiore pende un filo di seta, che

tiene orizzontalmente sospesa un assicella di legno che negli estremi porta infisse due verghette calamitate che si corrispondono pei poli ominimi: al braccio inferiore sta fermato un anello di legno. Perpendicolarmente all'assicella che porta le due calamite è fermato un filo metallico che voltato a punte negli estremi pesca da un lato nel mercurio contenuto nell'anello, dall'altro in quello della coppa soprapposta alla colonnetta *s*. Immergendo uno dei reofori della pila nel mercurio dell'anello, l'altro in quello della coppa, si vedrà il sistema delle due calamite rotare intorno al conduttore *s*.

Lo stesso apparecchio, ordinato come indica la fig. 290*a*, serve alla rotazione di una calamita intorno al suo asse. A tal uopo si ferma con vite di pressione ad un'estremità della calamita un anello che porta una piccola coppa, dal fondo della quale si eleva un piccolo uncino: con questo si sospende la calamita ad un filo di seta ligato al braccio superiore del sostegno. Un altro anello fermato similmente verso il mezzo della calamita, porta un filo metallico che pesca nel mercurio del canaletto di legno. Introducendo un reoforo della pila nel mercurio della coppa soprapposta alla calamita, l'altro in quello del canaletto, si vedrà la verga magnetica girare intorno al proprio asse.

Fa d'uopo intanto osservare che se nell'apparecchio della fig. 263 sono le correnti orizzontali che producono la rotazione della calamita, in quelli rappresentati dalle fig. 290 e 290*a* è viceversa la corrente che muove pel conduttore *s* (Fig. 290), e pel corpo stesso della calamita nel caso della fig. 290*a*.

— 4.° La fig. 290*b* rappresenta un disco di rame girevole intorno ad un asse orizzontale ed in mezzo ai poli di una robusta calamita a ferro di cavallo. Il disco col suo orlo amalgamato preme contro la molla *s* comunicante colla vite di pressione *a*: a questa è attaccato un filo di rame che dopo essersi avvolto in *m* intorno al telaio di un galvanometro, vien fermato nell'altro estremo dalla vite *b* congiunta all'asse di rotazione. Girando a destra il disco, l'ago galvanometrico indicherà una corrente diretta dal centro alla circonferenza, Magnetismo girante.

e girandolo in senso contrario si troverà che viceversa la corrente vi procede dalla circonferenza al centro. Or ammettendo il principio amperiano e supponendo che il polo anteriore della calamita sia il boreale, la corrente che lo costituisce, dovrà esservi ascendente sulle facce prossime al disco; ed in conseguenza allora dovremo dire che la corrente generata nel disco pel fatto della sua rotazione, vi procederà dal centro alla circonferenza o viceversa, secondo che la rotazione sarà fatta per lo stesso verso o in senso opposto alla direzione che la corrente propria della calamita segue sulle facce che sono prossime al disco.

Quando tra il centro e la circonferenza del disco non siavi conduttore esterno, il circuito elettrico dovrà necessariamente chiudersi nel disco stesso. Ciò posto, immaginiamo che il disco sia mobile intorno all'asse verticale *o* (Fig. 290 *e*) e che a piccola distanza dalla sua faccia superiore sia orizzontalmente sospeso un ago magnetico, il cui polo boreale sia in *b* e l'australe in *a*. La corrente propria dell'ago sulla faccia prossima al disco sarà diretta come indica la freccia punteggiata; in conseguenza se la rotazione va da sinistra a destra, la corrente indotta nel disco dal polo *b* dovrà per la regola precedente andare dalla circonferenza al centro, e quella indotta dal polo *a* procederà viceversa dal centro alla circonferenza. Il moto elettrico seguirà dunque una via presso che simile a quella indicata nella figura per mezzo delle piccole frecce; ed in conseguenza tra l'ago ed il disco dovrà esservi attrazione a destra e ripulsione a sinistra del polo *b*, e viceversa ripulsione a destra ed attrazione a sinistra del polo *a*. Così l'ago dovrà girare nel senso del disco, e lo stesso farebbe se la rotazione movesse in senso contrario, com'è facile rilevare dalla fig. 290 *d*.

Or prima che Faraday avesse scoverto le correnti indotte ed ideato l'esperimento del disco rotante tra i poli di una calamita, Arago aveva osservato che l'ago di una bussola con fondo di rame scemava rapidamente l'ampiezza delle sue oscillazioni, senza che ciò potesse attribuirsi a resistenza nel mo-

do di sospensione ; e che la stessa cosa avveniva sostituendo altri metalli al rame, ed anche dell'acqua, del ghiaccio ecc. E guidato dal principio della reazione sempre eguale ed opposta all'azione, egli lasciò l'ago in riposo e diede rapida rotazione al sottoposto disco ; si vide l'ago muoversi per lo stesso verso. Se dunque questi fatti fossero stati ignoti all'epoca in cui scoprivasi l'induzione delle correnti, l'analogia delle calamite coi cilindri elettrodinamici li avrebbe rivelati.

E dicasi altrettanto delle leggi che per quest'azione dei conduttori giranti prossimamente ad un ago magnetico, furono trovate prima che se ne sapesse la cagione; vale a dire:

— 1° Che l'energia dell'azione decresce come si aumenta la distanza tra il disco e l'ago.

— 2° Che per una data distanza e celerità di rotazione l'effetto risulta proporzionale al potere conduttore della sostanza del disco.

— 3° Che interrompendo il disco nel senso dei raggi, la maggior parte dell'effetto sparisce; ma poi si vedrà presso che interamente ripristinato, qualora i voti sieno riempiti saldandovi dei pezzi di altro metallo, ancorchè ciò non si facesse che verso l'orlo soltanto del disco.

— 5° Sappiamo (n° 257) esservi dei corpi che sono ripulsi dai due poli di una calamita, e che Faraday ha distinto col nome di *diamagnetici*. Se le calamite non sono che solenoidi ed una corrente non può agire a distanza se non inducendo un'altra corrente, l'azione diamagnetica deve necessariamente consistere nella produzione di una corrente opposta a quella che sarebbe indotta in un corpo magnetico, e che produrrà nell'estremità dell'indotto prossima alla calamita inducente un polo dello stesso nome. Quindi se prossimi tra loro si faranno agire sopra un corpo diamagnetico i poli eteronimi di due calamite, le loro azioni dovranno neutralizzarsi a vicenda. Teoria del diamagnetismo.

Questa conseguenza è stata verificata da Tyndal mercè l'apparecchio rappresentato dalla fig. 290 *e*, composto di due vigorosi elettromagneti A e B, i cui cilindri di ferro dolce sono curvati negli estremi P e Q, e recati a contatto mercè le loro

facce spianate. Facendo circolare la corrente per le spire degli elettromagneti in modo da produrre poli omonimi in P e Q, un pezzetto di bismuto avvicinato alla congiunzione dei due cilindri ne sarà ripulso, ma resterà immobile, quando la corrente andrà per quelle spire in modo da far risultare in P e Q due poli eteronimi.

E che realmente le calamite producano nei corpi diamagnetici polarità quali son richieste dalla teorica di Ampère, Tyndal lo ha dimostrato con un ingegnoso esperimento. Nel vano del rocchello R (Fig. 290 *f*) pende sospeso a filo di seta un bastoncello *a* di bismuto per mezzo di una staffa fatta con filo di argento. Il rocchello è provveduto di spirale di filo di rame da farne un vigoroso elettromagnete, e quattro calamite temporanee A, B, C, D, situate perpendicolarmente alla direzione del bismuto, tengono gli estremi di quel bastoncello in mezzo ai loro poli, che seno entrambi boreali per le calamite A e B, ed australi per le calamite C e D. Facendo circolare per le spire del rocchello una corrente elettrica come indica la freccia, si vedrà l'estremo *a* del bismuto avvicinarsi al polo nord della calamita A, e l'estremo opposto al polo sud di D. Invertendo la direzione della corrente, resterà invertito ancora il moto del bismuto. Nel primo caso si è dunque prodotto un polo australe nell'estremo *a* ed un polo boreale nell'altro estremo; nel secondo si è avuto viceversa polo boreale in *a* polo australe nell'altro estremo. Or se al bismuto fosse stato sostituito il ferro dolce, in *a* si sarebbe ottenuto un polo boreale nel primo caso, ed un polo australe nel secondo. Dunque realmente le calamite inducono nei corpi diamagnetici polarità opposte a quelle generate nei corpi magnetici.

Induzione unipolare.

300. In tutti i fenomeni d'induzione magneto-elettrica finora considerati, sono intervenuti i due poli della calamita inducente. Ora Weber ha trovato potersi generare una corrente da uno dei poli soltanto, e da ciò il nome d'*induzione unipolare*. Il pezzo principale dell'apparecchio all'uopo adoperato da Weber, è rappresentato nella fig. 288 *bis*. Una calamita cilindrica NS è mobile intorno al suo asse mercè due

punte di acciaio impiantate nei centri delle due basi, e che si appoggiano a fori esistenti nelle pareti delle due camere di ferro A e B, le quali sono destinate a ricevere i poli opposti di due vigorose calamite per accrescere quelli della calamita mobile. Un anello lenticolare di ottone la circonda nella sua linea media, e col suo orlo pesca nel mercurio della sottoposta vaschetta. Immergendo in questa un capo del filo galvanometrico, fermando l'altro ad una delle due camere, e dando alla calamita una rapida rotazione mercè un sistema di ruote dentale che ingranano col rocchetto *h*, si avrà una corrente generata dal polo boreale o dall'australe della calamita girante, secondochè l'altro capo del filo galvanometrico sarà unito alla camera A, ovvero alla B.

L'induzione unipolare diviene un fatto di alta importanza nella scienza del magnetismo, qualora da un lato si consideri che non può coordinarsi alla dottrina di Ampère senza ricorrere all'ipotesi inammissibile di un'azione induttrice normale al piano della solenoide, e dall'altro che Weber fu condotto alla scoverta di questa induzione supponendo reale l'esistenza dei due fluidi magnetici.

CAPO TREDICESIMO.

ELETTRICITÀ ANIMALE.

301. Tra le sperienze, che i seguaci di Galvani opponevano al sistema dell'elettricità metallica, vi è quella dei convellimenti prodotti in una rana dal contatto dei muscoli delle cosce coi nervi lombari. Ma Volta, facendo osservare che lo sbilancio elettrico avveniva pel contatto di due sostanze eterogenee, traeva da quell'esperimento del Dot. Valli novello argomento a favore del suo principio. Eravi purtuttavia una circostanza che rendeva oscuro il fenomeno, ed era quella della necessità di adoperare una rana robusta e di fresco preparata, Corrente della rana.

perchè i convellimenti avessero luogo. Il fatto era dunque dipendente dalla vitalità degli organi; ma in qual modo? — Era forse che i muscoli avevano perduta coll'ultimo residuo di vita la proprietà di contrarsi, quantunque il loro contatto coi nervi continuasse a svolgere l'elettrico con egual forza? — Se questo dato si fosse potuto assicurare, Volta sarebbe stato debitore ai Galvaniani della pruova più luminosa del suo principio — Poteva darsi ancora che nello spegnersi l'ultimo residuo di vita fosse esaurita la contrattilità muscolare insieme alla forza elettromotrice; ed in questo caso l'elettricità animale sarebbe apparsa come un fatto incontrastabile — Il galvanometro intanto che solo avrebbe potuto rischiarare questi dubbii, allora non esisteva; nè i fisici, a cui mancava l'idea di un istrumento indicatore di corrente elettrica, potevano sospettare ch'essi già possedevano nella rana un sensibile reoscopio.

Fu Nobili il primo che ponesse fuori dubbio l'esistenza di una corrente propria della rana. Egli preparata che n'ebbe una al modo di Galvani, prese due bicchierini con acqua salata ed immerse nell'uno i piedi, nell'altro il tronco di colonna vertebrale che restava unito ai nervi crurali; chiuse il circuito con due laminette di platino congiunte ai capi di un sensibile galvanometro, e vide la gamba della rana convellersi mentre l'ago magnetico indicava una corrente diretta dai nervi ai muscoli. Le contrazioni bentosto cessarono, ma il galvanometro continuò ad indicare l'esistenza di una corrente, che sempre scemando di energia, venne in fine a sparire del tutto.

Questi risultamenti ottenuti dal fisico fiorentino, e che ridussero i Voltiani al silenzio, si appalesavano di sommo interesse sotto l'aspetto fisiologico, sia perchè dimostravano l'esistenza di una forza elettromotrice strettamente congiunta alla vitalità organica, sia perchè la facevano vedere indipendente dalla vita e quindi dall'attività dei nervi del moto, da cui derivavano i convellimenti muscolari.

Corrente muscolare.

302. Nobili aveva trovato esser la rana più sensibile all'azione della corrente elettrica di quel che fosse il più squisito

dei suoi galvanometri; e fin dalle prime ricerche galvaniche Volta aveva osservato i convellimenti della rana quando chiudeva il circuito di due metalli differenti con un pezzo del nervo crurale. Da questi due fatti risultò l'idea della *rana galvanoscopica* del prof. Matteucci, la quale consiste in una gamba di rana, denudata della sua pelle e portante sospesa tutta la lunghezza del nervo ischiatico: la gamba va introdotta in un tubo di vetro coverto di vernice isolante, e fuori del quale pende il filamento nervoso.

Fatta in un animale vivente una leggiera incisione sopra uno dei suoi muscoli già denudato dei tegumenti, Matteucci faceva che due punti del nervo della rana galvanoscopica toccassero l'uno il fondo, l'altro il labbro della ferita, e tosto vedeva la gamba della rana convellersi. Il muscolo era dunque percorso da una corrente elettrica; e quando allo stesso modo con cui vi era stato introdotto il nervo ischiatico, vi furono applicati due fili di platino congiunti ai capi di un sensibile galvanometro, si conobbe che la corrente vi era diretta da dentro in fuori. Nè soltanto nello stato di vita dell'animale, ma dopo la morte ancora la corrente muscolare è tuttavia sensibile per un certo tempo.

Ed oltre ai muscoli anche nei nervi, come Dû Bois Reymond ha dimostrato, esiste una corrente elettrica egualmente diretta.

303. Avvi degli animali provveduti di speciali organi elettromotori, e tali sono i così detti *pesci elettrici*. Se ne conoscono tre specie principali, la *torpedine*, il *ginnoto* ed il *siluro*. Pesci elettrici.

Di queste tre specie la più anticamente conosciuta è la torpedine, che si trova specialmente sulle coste del Mediterraneo e dell'Oceano atlantico. Il suo nome già indica l'effetto delle sue scariche elettriche; e quando i fisici lo attribuivano a certe *molecole stupefacienti* che immaginavano emesse dal corpo dell'animale, gli Arabi da remotissimo tempo disegnavano la torpedine col nome di *râad* o *raasch* che suona lo stesso che *fulmine*.

Pare che il D.r Bancroft fosse stato il primo a riguardare il fenomeno prodotto dalla torpedine come un effetto elettrico. Indi Walsh ne stabiliva l'analogia colla boccia di Leyden, facendo che più persone ricevessero ad un tempo la scossa, formando la solita catena, di cui le persone situate negli estremi toccavano l'una il dorso, l'altra il ventre dell'animale. Chiudendo il circuito tra questi due punti del suo corpo si è quasi certo di avere la commozione; e se talvolta la si ottiene toccando solamente il dorso o il ventre, ciò avviene perchè il corpo dell'animale non si trova abbastanza isolato, ed il circuito si compie per mezzo del suolo e del sostegno.

Le diverse specie di pesci elettrici non hanno egual potere di scuotere. Humboldt assicurava che da veruna giara elettrica aveva giammai ricevuto uno scuotimento pari a quello, che ebbe poggiando i piedi sopra un ginnoto allora tratto dalle acque, in una pesca fatta dagl'Indiani presso il villaggio *Rastro de Abaso*.

In tutte le specie però la scarica provviene da un organo speciale, che nella torpedine consiste in 400 a 500 colonnette prismatiche, composte di una serie di vescichette. Quest'organo giace prossimo alla testa; e le ricerche galvanometriche hanno dimostrato che la scarica va pel filo di congiunzione dal dorso al ventre. Nel ginnoto poi, secondo gli sperimenti istituiti da Faraday, la corrente procede nel filo congiuntivo dalla testa alla coda dell'animale.

Walsh ottenne facilmente la scintilla dal ginnoto, ma non pervenne giammai ad averla dalla torpedine. Il primo a riuscirvi fu il P. Santi Linari, che sulle prime l'ebbe mercè l'opera di una spirale, e poi senza l'ajuto di questa induzione. Egli riuscì ancora a caricare coll'elettricità della torpedine un sensibile elettroscopio condensatore, ed ottenere così i fenomeni di tensione, inutilmente cercati prima da Walsh, indi da Humboldt e Gay-Lussac.

Per completare in fine l'analogia del potere dei pesci elettrici coll'ordinaria elettricità, i fisici istituirono esperimenti, pel cui mezzo ottennero l'arroventire dei fili metallici, le de-

composizioni chimiche, e la magnetizzazione degli aghi di acciaio chiusi dentro spirali di fili metallici.

CAPO QUATTORDICESIMO.

APPLICAZIONI PRATICHE DELL' ELETTRICITÀ DINAMICA.

309. Le applicazioni del potere chimico delle correnti elettriche alle arti possono in generale riassumersi nella soluzione del seguente problema: *togliere un metallo e talvolta un ossido metallico da certe combinazioni in cui si trova, e far che si deponga su alcuni corpi formandovi uno strato consistente.* La scienza, come di ordinario avviene, ha somministrato il piano generale della soluzione; l'arte ha poi cercato empiricamente le condizioni che debbono esser soddisfatte per ottenere l'intento. Elettro-doratura.

Brugnatelli pel primo vide che nell'elettrolisi di alcuni sali, il metallo che ne forma la base, si depone puro d'ogni combinazione sul polo negativo della pila. Le soluzioni che meglio gli riuscirono all'uopo, furono quelle degli ammoniuri; ed avendo messi a pruova gli ammoniuri di rame e di oro, ottenne *l'elettroramatura* e *l' elettrodoratura.* Su di che, esponendo nel 1805 le scoverte chimiche fatte nell' anno precedente, egli scriveva: *anche noi abbiamo ottenuto l'anno scorso degli utili risultati colle nostre ricerche... abbiamo fatto vedere come l'ammoniuro di oro possa servire a dorare l' argento per mezzo della pila voltaica* — Trentasei anni dopo, De la Rive usò il cloruro in vece dell' ammoniuro d' oro, e fu salutato inventore dell'elettrodoratura!

Il metodo seguito dall' illustre chimico di Pavia, e che il Grimelli anni or sono rinveniva in un' opera in quel tempo pubblicata in Milano sotto il titolo di *Biblioteca di Campagna*, consisteva nello immergere in una soluzione di ammoniuro d'oro il pezzo da dorarsi, già congiunto al polo negativo di

una pila, e poi chiudere il circuito con una strisciolina di cartone bagnato che si faceva pescare nella stessa soluzione.

De la Rive poi ottenne la doratura galvanica immergendo il pezzo da dorarsi in un cilindro di vetro con fondo chiuso da una membrana, e messo in un recipiente con acqua acidulata. Il pezzo di argento o di rame che si vuol dorare, dovendo essere ben terso, perciò bisogna talvolta immergerlo per qualche tempo nell'acqua acidulata, congiungendolo allo zinco per mezzo di un filo di platino. Varie altre avvertenze fa d'uopo seguire rispetto alla temperatura e al grado della soluzione; ma per queste ed altre cose bisogna ricorrere alle opere speciali.

Quando il metodo di De la Rive venne adottato dai doratori, si vide che l'oro depositato dal cloruro formava una pellicola assai sottile, e che non si poteva farla doppia per prolungata immersione, senza renderla meno aderente. Elkington, negoziante inglese, trovò che il mezzo di eliminare questo difetto, era quello di usare una soluzione di cianuro di oro e potassio.

In fine Ruolz ha saputo dare la soluzione generale del problema, sia perfezionando i processi d'inargentare e dorare, estendendoli anche al ferro ed all'acciaio; sia scovrendo i metodi elettrici di stagnare, piombare, platinare, zincare ecc.

Galvanoplastica.

310. Prima che De la Rive avesse richiamata l'attenzione dei fisici sull'elettrodoratura, Spencer in Inghilterra e Jacobi in Russia, concepivano presso che nel tempo stesso l'idea di poter modellare in rame una qualsiasi forma, osservando la regolarità con cui questo metallo, separandosi dalla combinazione in cui si trova, si fissa sull'elettrodo negativo di una pila. Così ebbe origine la galvanoplastica, mercè la quale si può coprire di rame una data forma, e si può averne una copia perfetta.

L'oggetto che si vuol sottoporre a questa operazione, dovendo funzionare da elettrodo negativo di una pila, è d'uopo che sia conduttore; ma se fosse di sostanza isolante, bisognerebbe *metallizzarlo*, ossia coprirne la superficie con sottilis-

sima polvere di piombo o di argento. E se vogliasi copiare una medaglia, un basso rilievo, ecc. si dovrà vincere ancora la difficoltà di separare la copia dall'originale; la qual cosa si ottiene coprendo l'oggetto da copiarsi di un sottilissimo strato di cera o di altra sostanza che mentre impedisce l'adesione non renda isolante la superficie.

Per farsi un'idea dell'utilità che l'arte sa trarre dalla galvanoplastica, basta vedere le figure intercalate nel testo di alcune opere di Fisica e di Meccanica recentemente pubblicate in Germania. Le figure di stupenda perfezione che si veggono a cagion di esempio nella Fisica del Müller e nella Meccanica del Weisbach, sono state impresse con tipi copiati col metodo galvanoplastico da incisioni fatte sul legno.

311. L'idea di far servire l'elettricità a stabilire una celere corrispondenza tra luoghi assai lontani, surse nella mente dei fisici tosto che si conobbe l'enorme velocità del movimento elettrico; ma sembra che verun modo di attuarla fosse stato escogitato prima del 1774, nel qual anno Lesage componeva in Genova un primo modello di telegrafo elettrico. Il quale consisteva in 24 pendolini elettrici che per mezzo di altrettanti fili metallici isolati potevano separatamente comunicare col conduttore di una macchina elettrica. Ad ogni pendolino corrispondeva una lettera dell'alfabeto; e quindi trovandosi la macchina elettrica in una stazione ed i pendolini nell'altra, si potevano trasmettere delle parole dalla prima alla seconda facendo successivamente divergere i pendolini corrispondenti alle lettere che le componevano. Elettro-telegrafia.

Non ostante la quasi impossibilità di far servire ad uso telegrafico l'elettricità di attrito, così facile a disperdesi nel mezzo ambiente e per la via dei sostegni, purtuttavia si vuole che nel 1797 Betancourt avesse stabilita per mezzo della boccia di Leyden una comunicazione elettrica tra Aranjuez e Madrid; e che nel 1798 l'Infante D. Antonio avesse ricevuta una nuova importante per mezzo di un telegrafo elettrico da lui fatto costruire secondo il piano, che due anni prima il Dot. Selva aveva presentato all'Accademia delle Scienze di Madrid.

Più fondate speranze di un'attuabile telegrafia elettrica si ebbero dopo la scoverta della pila; e già nel 1809 Soemmering presentava all'Accademia di Monaco un piano completo di telegrafia elettrica. Ad uno scrittojo stavano fermati i capi di 27 fili metallici, che a due a due potevano esser congiunti ai poli di una pila composta di 10 coppie argento e zinco. I capi opposti dei fili, lunghi quanto l'intervallo delle due stazioni, finivano in altrettante punte di oro, sporgenti dal fondo di un truogo di vetro pieno di acqua. Sì alla prima che alla seconda serie dei capi di filo corrispondevano le lettere dell'alfabeto tedesco, più due segni, l'uno per le lettere doppie, l'altro per indicare la fine di ciascuna parola. Essendo facilissima cosa distinguere nell'elettrolisi dell'acqua il filo che dà l'idrogeno da quello che dà l'ossigeno, la trasmissione della scrittura per mezzo del telegrafo non poteva incontrare veruna difficoltà dopo essersi convenuti sull'ordine ossigeno-idrogeno, o viceversa, da seguirsi tanto nell'inviare che nel ricevere un dispaccio.

Nè Soemmering mancò di provvedere al modo di fare avvertita la stazione a cui il dispaccio voleva spedirsi; ed ingegnosissimo era il meccanismo all'uopo inventato. Si componeva di una leva che in un braccio finiva con una calotta immersa nell'acqua del truogo, e che si teneva in bilico per opera di un contropeso mobile sull'altro braccio. Conosciuti i fili che finivano nelle punte di oro situate giusto sotto la calotta, vi si attaccavano i due reofori: i gas che se ne svolgevano, elevandosi nell'acqua del truogo, si riunivano sotto la calotta, e rendendola più leggiera, facevano squilibrare la leva dal lato opposto. Così il contrappeso ne cadeva, ed urtando nella sua discesa contro una molla, liberava il moto di una soneria già caricata.

Quando nel 1819 Oersted rifermava la scoverta del Romagnosi sul potere delle correnti elettriche in deviare l'ago magnetico, Laplace vide di quanta importanza era il fatto riguardo alla telegrafia elettrica, e ne suggerì l'idea ad Ampère; ma questa idea non si vide attuata prima del 1834, in cui Gauss

e Weber costruirono un telegrafo per avere una comunicazione tra l'Osservatorio ed il gabinetto di Fisica dell'Università di Gottinga. I segnali erano dati dalle oscillazioni di una verga magnetica prodotte dal passaggio di una corrente elettrica.

Al telegrafo di Gottinga seguiva nel 1837 l'altro che Steinheil poneva a Monaco per la lunghezza di circa una lega e tre quarti di Germania. In un filo lungo 36000 piedi e doppio tre quarti di linea egli spingeva una corrente elettrica mediante un apparecchio analogo a quello di Clarke, ma costrutto in modo che la resistenza nella porzione attuata fosse grandissima rispetto a quella della porzione destinata a condurre, affinchè la corrente tenesse inalterata la sua forza in tutta la lunghezza del circuito. Il conduttore formava ad ogni stazione un moltiplicatore di 400 a 500 giri di uu sottilissimo filo di rame, in mezzo alle cui spire stavano due verghe magnetiche mobili intorno ad assi verticali. Le verghe potendo deviare da un lato o dall'altro del loro meridiano secondo la diversa direzione della corrente, somministravano quattro diverse indicazioni rese vieppiù sensibili da quattro suoni distinti che si avevano per l'urto delle verghe contro alcune piccole campane. Le calamite erano inoltre provvedute di piccoli tubi acuminati, pieni di particolare inchiostro con cui segnavano dei punti sopra una striscia di carta che scorreva con moto uniforme. Combinando in varii modi i punti risultanti dal diverso moto delle verghe, Steinheil ha potuto comporre l'intero alfabeto ed i segni necessarii alla scrittura dei numeri.

Il telegrafo di Steinheil era appena stabilito, e già in Inghilterra se ne annunziava un altro inventato da Wheatstone. Era un telegrafo a cinque aghi, che colle loro diverse deviazioni indicavano le varie lettere dell'alfabeto; e sotto questa forma fu adoperato a stabilire la prima linea telegrafica inglese per la distanza di un miglio e mezzo sulla ferrovia che unisce Londra e Birmingham. Wheatstone semplificò in seguito questo suo primo telegrafo, riducendolo a due soli aghi, e sotto questa nuova forma è comunemente usato in Inghilterra.

Il telegrafo ad aghi, il quale non parla che agli occhi e con

segni fugaci, aveva bisogno di un mezzo per avvertire una delle stazioni che l'altra già cominciava a trasmetterle un dispaccio. Il magnetismo temporaneo del ferro dolce, che l'azione della stessa corrente telegrafica avrebbe potuto eccitare, si presentava all'uopo per mettere in moto una molla di scappamento per mezzo dell' attrazione dell'elettromagnete. Ma da sperienze preparatorie si rilevava che con aumentare la lunghezza del circuito la forza magnetizzante della corrente diminuiva sì rapidamente da non esser possibile di trasmetterla a grande distanza. Questa scoraggiante difficoltà fu non pertanto superata da Wheatstone mercè un'esatta cognizione delle leggi di Ohm. Nella costruzione degli elettromagneti adoperavasi un filo non molto sottile, il fisico inglese usò invece un filo sottilissimo ed a molti giri. In tal modo la resistenza del circuito veniva ad aumentarsi, ma poichè non cessava di essere una piccola frazione rispetto a quella dell'intero circuito, così risultava un aumento nella forza magnetizzante della corrente. [1] Ed avuto così il mezzo di poter eccitare un sufficiente magnetismo nel ferro dolce a grandissima distanza dalla pila, non fu difficile comporre il meccanismo che doveva dar l'avviso. Consisteva questo meccanismo in una soneria a corda, il cui moto era impedito da un ostacolo congiunto all'àncora dell'elettromagnete: quando per la circolazione della corrente l'àncora era attratta, l'ostacolo veniva rimosso ed il suono si produceva.

[1] Chiamando L la lunghezza ridotta del filo congiungente le due stazioni, λ quella del filo avvolto intorno all'elettromagnete, ed A la tensione della pila, la forza magnetizzante della corrente sarà espressa da $\frac{A}{L+\lambda}$. Or poniamo che nella composizione dell'elettromagnete si fosse adoperato un filo che essendo n volte più lungo del primo avesse un'area di sezione n volte minore, la resistenza dell'intero circuito sarebbe stata $L+n^2\lambda$; e poichè con un filo n volte più lungo si può fare intorno alla calamita un numero di giri n volte maggiore, così la forza magnetizzante della corrente si troverà espressa da $\frac{nA}{L+n^2\lambda}$; quindi se $n^2\lambda$ è trascurabile rispetto ad L, quella forza sarà divenuta n volte più grande.

I felici risultamenti ottenuti dal Wheatstone sul modo di conservare la forza magnetizzante della corrente in un lungo circuito, lo condussero più tardi alla invenzione del suo telegrafo elettromagnetico, che sotto la forma più semplice vedesi rappresenntato nella fig. 290*g*. Si compone del *comunicatore* A donde parte il dispaccio, e dell'*indicatore* B che lo riceve. Il primo è formato da una ruota R di legno, sulla quale sta incisa la serie dei segni telegrafici o delle lettere dell' alfabeto, circondata da un cerchio di rame che porta scolpiti tanti fori quanti sono i segni. Al centro della ruota sta fissata la manovella M, che può girare insieme alla ruota o senza di essa, secondo che un'appendice di cui è provveduta, viene introdotta in uno dei fori o ne resta fuori. L'orlo della ruota è ondulato, affinchè nella rotazione la leva G L, mobile intorno all'asse O, venisse a toccare or la colonnetta di rame C ed or C'. Con C comunica uno dei poli della pila, l'altro si congiunge all' indicatore per mezzo del filo telegrafico. Quando la leva GL tocca C, il circuito è chiuso, le calamite temporanee E si magnetizzano e l'àncora K viene attratta; quando poi la stessa leva passa a toccare C', la corrente s'interrompe, le calamite si smagnetizzano, e l'àncora torna al primo posto, a cui tende per l'azione di una molla. All'àncora è congiunta una ruota di scappamento, a cui è affidato l'indice *h*, mobile sopra un quadrante (Fig. 290*h*) sul quale stanno scolpiti gli stessi segni che si trovano sulla ruota del comunicatore; e così mediante l'oscillazione dell'àncora l'indice è trasportato sul quadrante e si arresta sullo stesso segno, che la manovella M ha menato contro l'ostacolo P del comunicatore.

Poco tempo dopo l' annunzio del primo telegrafo elettrico di Wheatstone, ne sorgeva un altro a Nuova Yorch per opera del celebre professor Morse. Gli elementi principali di questo telegrafo, il *registro* e la *chiave*, sono rappresentati nella fig. 291. Il registro si compone di due elettromagneti A fermati al pezzo di legno B, che superiormente finiscè nella staffa C; la quale tiene sospesa la leva orizzontale B ad un estremo della quale sta saldata l'àncora E. Quando la corrente

circola per le spire dell'elettromagnete, l'àncora è attratta, ed una punta di acciaio, di cui la leva è provveduta nell'altro estremo, preme contro una zona di carta che per speciale congegno si svolge dal cilindro F, e vi lascia un'impressione più o meno lunga secondo la durata del contatto dell'àncora colla calamita, vale a dire secondo il tempo pel quale la corrente è circolata per le spire dell'elettromagnete. Così se il contatto non si fa durare che un istante, sulla carta si troverà segnato un punto; e si troverà in vece una linea più o meno lunga, se il contatto sia stato più o meno prolungato. Combinando dei punti con linee più o meno lunghe, il prof. Morse ha potuto comporre un intero alfabeto.

Il registro sta in una delle stazioni, nell'altra è la chiave. Questa consiste nell'incudine G, nella quale si preme col martello H mercè la sbarra K. Quando il martello e l'incudine sono a contatto, il circuito elettrico è chiuso, l'àncora rimane aderente all'elettromagnete, e la punta preme contro la carta. Lasciando poi di premere sulla sbarra K, il martello si alza, il circuito s'interrompe, l'àncora si stacca dall' elettromagnete e la punta cessa di operare sulla carta. Così la persona che trovasi presso la chiave, mette in azione il registro che sta nell' altra stazione, e vi stampa il dispaccio che vuol trasmettere.

Tutti i telegrafi finora stabiliti agiscono *indicando* o *imprimendo*, quindi vanno nella classe del telegrafo di Wheatstone o di quello di Morse. Il primo sistema ha lo svantaggio di richiedere un'attenzione continuata in colui che riceve il dispaccio, mentre col secondo sistema il dispaccio si trasmette anche in assenza del ricevitore.

Conduzione terrestre.

312. Dopochè la stupenda invenzione della telegrafia elettrica fu assicurata dal lato della scienza, essa non poteva divenire un fatto di pratica utilità prima che si fossero eleminate alcune gravi difficoltà economiche, tra le quali non era ultima l'ingente spesa di un lunghissimo circuito in filo metallico. Or le ricerche all'uopo istituite menarono all'importante scoverta della conduzione terrestre.

Nel 1835 Gauss osservava per la prima volta una corrente

elettrica in un filo metallico che congiungeva due lamine, l'una di zinco e l'altra di rame sepolto nel suolo alla mutua distanza di un mezzo miglio geografico. Più tardi Steinheil ergendo il suo telegrafo elettrico a Monaco, compiva il circuito per mezzo della terra, introducendovi due larghe lamine metalliche congiunte ai capi estremi del filo conduttore.

Questi risultamenti, pei quali si è potuta ridurre a metà la lunghezza del filo telegrafico, menarono ancora alla conseguenza di poter far a meno della pila per mettere in azione un telegrafo. Wail nel 1844 introduceva nella terra ed alla mutua distanza di 300 metri due lamine, l' una di zinco e l' altra di rame; saldava a ciascuna di esse un filo di rame, i cui capi estremi univa al telegrafo elettrico, e trovava questa semplice coppia sufficiente a metterlo in azione. Da questo felice risultamento prese animo a tentare la pruova sopra una distanza incomparabilmente più grande, da Washington a Baltimore; lo effetto non mancò di aver luogo, ma soltanto diminuito in quantità richiese l'uso di apparecchi più sensibili.

Delle ricerche istituite da Breguet all' occasione di stabilire la linea telegrafica da Parigi a Rouen, fecero conoscere un fatto importante rispetto alla natura della conduzione terrestre. Con un' esatta bussola di seni fu misurata la forza della corrente, e quando il circuito tra le due stazioni suindicate era tutto metallico, e quando alla metà di esso veniva sostituita la conduzione della terra. Prendendo un valore medio di tutte le misure, si ebbe nel primo caso per valore della corrente a Parigi 29,1 e 17,8 a Rouen, e nel secondo la corrente riuscì 56, 8 a Parigi e 35,5 a Rouen; vale a dire che nel secondo caso la corrente fu presso che doppia di quel ch' era stata nel primo. Sembrava ben naturale che questo fatto dipendesse dall' esser la terra un conduttore la cui area di sezione essendo grandissima, la sua resistenza debba essere presso che nulla; ma altri e tra questi l'illustre Gauss, posero innanzi l' idea che la terra anzichè condurre l'elettrico da un capo all'altro del filo conduttore, ivi non facesse che succhiarlo, e così promuovere una corrente nel filo senza chiuderne il circuito. Evvi però

contro questa spiegazione un fatto osservato dal prof. Matteucci; il quale dopo aver chiuso il circuito di una pila coll'introdurre nella terra due lamine distanti tra loro di 160 metri, in punti intermedii ai luoghi di queste due lamine e presso che in linea retta con essi egli introdusse nella terra altre due lamine congiunte ad un sensibile galvanometro, e vide che ogni qualvolta chiudeva il primo circuito, l'ago galvanometrico indicava nel filo congiungente le seconde lamine, una corrente diretta egualmente che la prima; o se di questa invertiva la direzione, trovava inverso anche il cammino dell'altra. La qual cosa chiaramente dimostra che la corrente osservata nel secondo filo non era che una derivazione dell'altra, e che in conseguenza la terra non agisca altrimenti che conducendo.

Celerità dell'elettrico nei fili telegrafici.

313. Si andrebbe assai lontano del vero, se la celerità dell'elettrico in un filo telegrafico si volesse ritenere come prossimamente eguale a quella trovata da Wheatstone (n.° 221) nella scarica di una boccia di Leyden. Questa risultò di 460800 chilometri a secondo, mentre dalle sperienze istituite da Walker sulle lineo telegraficho americane si ha una velocità di 30000 chilometri a secondo.

Più piccola ancora riesce la velocità della corrente quando il filo telegrafico, tuttochè perfettamente isolato, sta sepolto nella terra o immerso nell'acqua. Da alcune sperienze fatte da Faraday sulla linea telegrafica tra Londra e Manchester, la quale giace sotterra, è risultata la velocità di circa 12000 chilometri a secondo: e per un filo immerso nell'acqua gli astronomi degli Osservatorii di Greenvich e Bruxelles ebbero la velocità di 4300 chilometri a secondo.

Nei quali risultamenti, oltre alla parte dovuta alla diversità della sorgente elettrica, voltaica nelle linee telegrafiche e d'attrito negli esperimenti di Wheatstone, è da considerarsi ancora l'effetto della induzione operata dalla corrente sul mezzo ambiente l'integumento isolante del filo, mezzo buon conduttore pei fili telegrafici sepolti nel suolo o immersi nell'acqua. La corrente voltaica allora agisce come quella che dal conduttore di una macchina elettrica si diffonde sull'armatura inter-

na di una batteria, ed inducendo elettricità eteronima sulla faccia di contatto dell'integumento col mezzo ambiente, è da questa elettricità impedita a correre più celeramente. La quale illazione è pienamente rifermata dai seguenti fatti osservati da Faraday.

Duecento gomitoli di filo di rame, lungo in ciascuno 800 metri e coperto di guttaperga, sospesi ad una serie di barche ordinate in un canale, stavano immersi nell'acqua, eccetto che per una piccola lunghezza verso gli estremi dei fili, congiunti tra loro in modo da formare un solo filo lungo 160000 metri. Un capo di questo lunghissimo filo fu congiunto per mezzo di un sensibile galvanometro ad uno dei poli di una pila di 360 coppie perfettamente isolata, e di cui l'altro polo comunicava col suolo. Appena stabilita la congiunzione del filo colla pila, si vide l'ago galvanometrico fortemente deviato dalla corrente che moveva a caricare l'enorme giara formata dal filo immerso nell'acqua; e quando la carica toccava il suo limite, l'ago non presentava un deviamento più grande di 5 gradi. Separando allora il filo dalla pila ed approssimandogli un dito si ebbe una forte scossa, che ripetendo la pruova si potè scomporre in altre minori mercè successivi ed istantanei contatti del dito col filo; e la commozione riuscì sensibile anche 5 minuti dopo la separazione del filo dalla pila. E se nell'operare questo distacco si lasciava il filo congiunto ad un capo del galvanometro, mentre l'altro comunicava col suolo, l'ago si vedeva fortemente deviato e per verso opposto al primo; e ciò per opera dell'elettrico che si scaricava dal filo nel suolo. De'quali fenomeni poi neppur uno se ne vide, quando i gomitoli si sospesero nell'aria anzichè nell'acqua.

314. Una delle prime e più belle applicazioni della telegrafia elettrica fu quella di far servire l'enorme celerità dell'elettrico a trasportare l'indicazione di un orologio sopra una serie di altri, e far che tutti movessero in perfetta coincidenza. Orologi elettrici.

Primo a concepirne l'idea ed attuarla fu Steinheil nel settembre del 1839. Indi nel novembre del 1840 Wheatstone presentava alla Società Reale di Londra il disegno del suo orologio elettrico.

Il pensiero di Steinheil fu quello di far sparire per mezzo del magnetismo del ferro dolce le piccole differenze che di mezz'ora in mezz'ora possano aver luogo negli orologi di un grande stabilimento, di un quartiere od anche di un' intera città. Per mezzo di un orologio regolatore la corrente veniva negli altri momentaneamente stabilita ed interrotta di mezz'ora in mezz'ora, e così un elettrocalamita moveva un' àncora la quale faceva che gl'indici fossero portati sulla mezz'ora di ciascun orologio, qualora pel moto dello stesso congegno non vi si trovassero precisamente. Questo modo d'uniformare l'indicazione del tempo fu per ordine del Re di Baviera applicato agli orologi del Reale Istituto per le giovani dame in Monaco.

Migliore fu il concetto del Wheatstone, come quello che non richiedendo che un solo orologio effettivo, aggiungeva al pregio economico quello di poter rendere coincidenti le indicazioni dei minuti sopra una serie di orologi anche divisi da lunghi intervalli come son quelli di una grande città. Per dare un'idea di questo modo di telegrafare il tempo, descriveremo, fra i diversi orologi elettrici inventati dopo quello del Wheatstone, l'orologio di Siemens-Halske, la cui costruzione è molto estesa in Berlino.

Un orologio regolatore ad ogni minuto mercè un'appendice alla ruota corrispondente, stabilisce ed interrompe la corrente elettrica pel filo L...L (Fig. 290*l*) che si avvolge intorno ai cilindri PP di ferro dolce formando le elettrocalamite MM. Allorchè la corrente circola per le spire dell' elettrocalamite, l'àncora *aa* è attratta; il braccio *c*, fermato all'estremità della leva fissa all'àncora, spinge un dente della ruota R che ne ha 60; ed un dente solo, imperocchè l'appendice *b* entrando nell'intervallo di due denti, impedisce l'ulteriore movimento della ruota. La quale, perchè non potesse retrocedere quando al cessare della corrente l' àncora è tratta contro l'ostacolo *i* dall' azione della molla *t*, viene ritenuta dalla leva uncinata *d*. Alla stessa ruota poi, e che porta l'indice dei minuti va unito il solito congegno per l'indicazione delle ore, e così queste divisioni del tempo si trovano coincidenti in tutta la serie degli orologi.

Un'altra applicazione dell'elettrodinamica all'arte dell'oriuolaio è quella di sostituire il magnetismo temporaneo del ferro dolce all'azione dei pesi e delle molle. La fig. 290*i* rappresenta un pendolo elettrico di quelli costrutti da Weare in Inghilterra. A è il pendolo, che unito al congegno dell'orologio in uno dei modi consueti, porta invece della lente un elettromagnete rettilineo E. Il quale, giacendo tra i poli N ed S di un pezzo di acciajo calamitato e girato a forma di contorno rettangolare, è fissato ad una stretta lamina di ottone, che finisce nelle due appendici *a* ed *a'*, a cui stanno saldati i capi della spirale. Il polo negativo della pila per mezzo del filo *b* sta unito alla calamita NS, ed il polo positivo sta congiunto al filo *h*, il quale scendendo lungo il pendolo si unisce con saldatura all'appendice *a'*. In fine, alle branche verticali della calamite NS sono unite le molle dorate *f* ed *f'*, le quali servono a chiudere il circuito elettrico, allorchè il pendolo mercè le sue oscillazioni porta a contatto una volta l'appendice *a* colla molla *f*, ed un'altra volta l'appendice *a'* con *f'*. Or la spirale essendo ordinata in modo che ad ogni chiusura del circuito sorge un polo nord nella sinistra dell' elettrocalamita ed un polo sud a destra, ne segue che dando meccanicamente moto al pendolo, la forza che esso andrà perdendo per la resistenza dell' aria e per l'attrito al punto di sospensione, sarà restituita dalla ripulsione che l' elettromagnete E riceverà dai poli della calamita N S, ai quali verrà alternamente avvicinandosi.

Lo stesso Weare ha sostituito ancora l'ettromagnetismo alle molle degli orologi a bilanciere. Nella fig. 290*k* è rappresentato uno di questi orologi: *cc* è il bilanciere, *b* il suo asse, *d* la molla spirale che deve respingerlo. Alle due colonnette *a*,*a'* vanno congiunti i reofori *k* e *z* di una pila, il primo unito al polo rame, il secondo al polo zinco: un filo metallico congiunge la base della colonnetta *a* con quella di *p*, un altro unisce *a'* con uno dei capi del filo moltiplicatore *rr'*, di cui l'altro capo è saldato alla colonnetta *p'*. All'asse *b* del bilanciere sono fermati in mezzo alle spire del moltiplicatore l'ago magnetico *uu'*, e sotto al moltiplicatore un anello di

avorio circondato in tutta la sua circonferenza da un filo d'oro che in due punti diametralmente opposti finisce nelle molle s, s'. Situato l'apparecchio in modo che le spire del moltiplicatore sieno parallele al meridiano magnetico, le due molle s, s' saranno a contatto colle colonnette p, p'; il circuito elettrico sarà chiuso, e quindi l'ago deviato dal suo meridiano. Allora le mollo s, s' saranno separate da p, p'; il circuito resterà interrotto, e la forza direttrice della terra insieme all'azione della spirale d ricondurrà l'ago nel suo meridiano, ed in conseguenza le molle s ed s' a rispettivo contatto con p e p'. Quindi nuovo deviamento dell'ago, e poi nuovo ritorno al suo meridiano ; e così il bilanciere durerà nel suo moto di oscillazione, finchè l'apparecchio voltaico conserverà la sua forza.

Orologio registrante di Lockes.

315. All'asse che porta l'indice dei secondi di un ordinario orologio astronomico, è fermata una ruota che porta 60 denti. Ad ogni secondo cho l'orologio batte , un dente dell'indicata ruota chiude per un istante il circuito di una pila , nel quale trovasi un'elettro calamita. Allora questa attira la sua àncora, ed un'acuminata martellina che le sta congiunta , segna un punto su di una sottoposta striscia di carta, la quale per mezzo di adatto congegno scorre con moto uniforme : così sulla carta verrà segnandosi una serie di punti, che rappresenterà quella dei secondi di tempo. La ruota che ad intervalli chiude il circuito, è fatta in modo che al batter del sessantesimo secondo il circuito rimane chiuso per un tempo alquanto maggiore, e quindi il sessantesimo secondo anzichè da un punto è rappresentato da una lineetta. A questo modo vengono indicati anche i minuti primi.

A fianco della suddetta elettrocalamita avvene un'altra, del pari provveduta di martellina , e compresa in un circolo voltaico che l'osservatore premendo sopra un tasto può chiudere quando vuole. Le due martelline stanno prossime l'una all'altra, e quando il dito preme sul tasto , la seconda martellina segna un punto sulla stessa carta che porta impressi i minuti ed i secondi. Poniamo ad esempio che si tratti di osservazione di un ecclissi solare: allora l'osservatore coll'occhio al can-

nocchiale e col dito sul tasto attenderà l'istante in cui il disco lunare toccherà quello del sole ; in quell'istante egli premerà sul tasto, ed il punto segnato dalla seconda martellina comparato che sia a quelli dei secondi darà l'istante preciso in cui il contatto è avvenuto.

Egli è facile comprendere come questo mezzo di misura possa far rilevare le minime frazioni di secondo, quando il moto della carta è abbastanza celere, perchè i secondi vi siono segnati a grandi intervalli.

LIBRO SETTIMO.

OTTICA.

CAPO PRIMO.

DELLA LUCE DIRETTA.

Raggio di luce.

316. La fig. 292 rappresenta un tubo A, nel quale n'entra un altro B a modo di quelli di un cannocchiale. Il primo porta scolpito nel centro del suo fondo C un piccolo foro, ed il secondo è chiuso in B da un cristallo piano spulito ovvero da una carta traslucida. Dirigendo l'asse comune dei due tubi ed un obbietto vivamente illuminato, se ne vedrà sul fondo B un'immagine capovolta, e più o meno grande in ragione della distanza di B da C. E se in vece di un obbietto illuminato, ne guardassimo attraverso i due tubi uno che avesse luce propria, come ad esempio la fiamma di una candela, ne avremmo lo stesso effetto, vale a dire che vedremmo in B un'immagine capovolta della fiamma.

Il fatto dell'immagine, simile all'obbietto ed inversamente disegnata, dimostra che da ogni punto di esso obbietto la luce si è mossa in linea retta e per ogni verso; ed in questo modo soltanto quella provveniente dalla faccia di prospetto al foro, ha potuto ad esso convergere, e quindi incrociarsi per andare a dipingere sul fondo B una figura simile e capovolta. Se il foro non fosse abbastanza piccolo, ad uno stesso punto del fondo B potrebbe convergere la luce partita da diversi punti dell'obbietto, e l'immagine ne verrebbe confusa in modo da non presentare che un semplice chiarore di forma simile a

quella del foro. Quindi si comprende come la luce diretta del sole, penetrando in una stanza buia per uno spiraglio nelle imposte, disegni sull'opposta parete un cerchietto luminoso. Di simili cerchietti si veggono non di rado nell'ombra che il fogliame di un albero proietta sul suolo; ed in ogni caso essi non sono che altrettante immagini del disco solare.

Per raffigurarci dunque il modo con cui la luce parte dalla superficie di un corpo luminoso, dovremo immaginare che da ogni punto di quella superficie muovano infinite rette che per ogni verso si diffondono. Ognuna di quelle rette è un *raggio di luce*, ogni loro minimo fascetto n'è un *pennello*.

Ombra e penombra.

317. Il moto rettilineo della luce è rifermato ancora dal fatto dell'*ombra*, come la sua diffusione per ogni verso dai singoli punti della superficie raggiante lo è dalla *penombra*.

Sia AB (Fig. 294) il corpo luminoso, e CD un corpo opaco. Se la luce muove in linea retta, verun raggio di essa potrà penetrare nello spazio DEC, che dicesi *ombra*. Questo spazio è finito sempre che il corpo luminoso è più grande di quello che ne intercetta la luce, e tale è il caso di ogni pianeta rispetto al sole: se il diametro del corpo luminoso fosse eguale o maggiore di quello del corpo opaco, l'ombra riuscirebbe necessariamente infinita.

Or in vece della conoide AEB che da un solo lato involge le due sfere, consideriamo l'altra che ha vertice in *s* e le inviluppa d'ambo i lati; e nello spazio figurato da questa seconda conoide consideriamo un punto *m*, e per esso nel piano, che ha comune coi centri delle due sfere, conduciamo la *m*C tangente al corpo opaco e prolungata fino ad incontrare il corpo luminoso in *n*. Se da ogni punto della superficie di questo corpo la luce si diffonde per ogni verso in linea retta, il punto *m* riceverà raggi da tutti i punti dell'arco A*n*, ma non ne avrà alcuno di quelli che moveranno dall'arco B*n*. Il punto *m* sarà dunque tanto meno illuminato, per quanto l'angolo *m*CE sarà più piccolo; ed in conseguenza, come il fatto riferma, il passaggio dall'ombra pura allo spazio uniformemente illuminato avverrà per mezzo di un' insensibile gradazione. L'intervallo

giacente fra le due conoidi GsF e DEC costituisce la *penombra*, la quale è sempre infinita, e manca nel solo caso che il corpo luminoso sia ridotto ad un punto geometrico, essendo che allora le due conoidi si confondono in una sola.

Legge della distanza.

318. Poichè da ciascun punto della superficie di un corpo luminoso partono dei pennelli di luce che per ogni verso si diffondono nello spazio, è chiaro che l'azione illuminante dovrà diminuire come andrà crescendo la sezione normale del pennello. Così ponendo che in A (Fig. 304) sia il punto raggiante, che sopra uno dei fascetti lucidi, che ne partono, sieno fatte le sezioni normali M ed N, l'azione illuminante sopra ogni punto di M starà a quella fatta sopra ogni punto di N, viceversa come l'area N è all'area M. Ma chiamando m ed n le distanze dei piani di M ed N dal centro A, vale per un noto teorema di Geometria la proporzione:

$$N : M = n^2 : m^2 ;$$

dunque se i ed i' rappresentano le azioni illuminanti sulle sezioni M ed N, avremo:

$$i : i' = n^2 : m^2 :$$

vale a dire che l'zione illuminante di una data sorgente di luce segue la ragione inversa dei quadrati delle distanze da essa sorgente. Quindi è che se dalla fiamma di una candela si ha un certo chiarore ad una data distanza, per ottenere lo stesso effetto di luce ad una distanza doppia bisogneranno quattro fiamme eguali alla prima.

Effetto della inclinazione dei raggi.

319. Sia C (Fig. 295) un centro luminoso, ed AB una superficie piana così piccola da poter considerare come paralleli i raggi CA, CB. Facendovi la sezione normale BD, si avrà:

$$BD = AB \operatorname{sen} BAD.$$

Or l'angolo BAD rappresenta l'inclinazione dei raggi alla superficie AB; e poichè quelli che incontrano AB sono gli stessi che incontrebbero CD, ne segue che chiamando i l'azione illuminante di una certa sorgente luminosa sopra un elemento

di superficie normale al cammino dei raggi, quella che avrebbe luogo sullo stesso elemento se fosse loro inclinato sotto l'angolo α, sarebbe espressa da $i\,\text{sen}\,\alpha$.

Questa legge, che rispetto alle superficie illuminate è una conseguenza del modo con cui i raggi muovono dalla loro sorgente, vale ancora per la quantità di raggi che le superficie illuminanti emettono in una data direzione. Imperocchè se poniamo che la superficie piana AB (Fig. 307*b*) emetta nella direzione normale BO la stessa quantità di raggi che da un eguale elemento invia nella direzione obbliqua AO, allora essendo la sezione $DE < AE$ l'elemento O di superficie illuminata riceverebbe da AE maggior quantità di raggi che da $CB = AE$. Quindi se il corpo luminoso avesse figura sferica dovrebbe apparire sotto forma di un disco più splendente nell'orlo che nel centro: tale dovrebbe sembrarci la luna nel suo plenilunio, ovvero un globo incandescente in una stanza buia. Ma poichè nel fatto non si osserva che un disco uniformemente lucido, così bisogna ritenere quanto all'emissione dei raggi dalle superficie illuminanti la stessa legge che regola il loro incontro colle superficie illuminate. Ed a viemeglio rifermare questo principio citiamo il fatto di una verga parallelepipeda di ferro a base quadrata, che fatta girare in una stanza buia intorno al suo asse verticalmente posto, presenta, dopo averla resa incandescente, l'aspetto di una striscia luminosa verticale che periodicamente varia di grandezza, secondo che presenta all'osservatore una delle sue facce, ovvero la proiezione di due facce sopra uno dei due piani diametrali.

Considerando ad un tempo la legge della ragione inversa dei quadrati delle distanze e quella del seno d'inclinazione, si trova che se la sorgente luminosa (Fig. 295) sia mobile secondo la CE perpendicolare al piano AE, la sua azione sull'elemento di superficie AB quando essa si avvicini a quel piano, si accrescerà per la diminuita distanza e scemerà pel diminuito angolo d'inclinazione dei raggi al piano; e viceversa avverrà quando C si allontani dallo stesso piano. Vi sarà dunque una distanza della sorgente luminosa C dal piano AE che ren-

derà massima la sua azione sull'elemento di superficie AB; ed infatti per mezzo del calcolo [1] si trova che la condizione del massimo è soddisfatta, quando la distanza CE della sorgente dal piano pareggia la frazione 0,707 della distanza BE dell'elemento di superficie AB dal piede della perpendicolare CE.

Fotometria. 320. Le teoriche della gravità, del calore, dell'elettricità e del magnetismo han concesso di ridurre a giusta precisione i loro strumenti di misura, appunto perchè costrutti sugli effetti che le forze, tolte ad esame da quelle teoriche, producono sulla materia ponderabile, e che d'ordinario consistono in variazioni di quantità lineari. Così la maggior o minor lunghezza di una sottile colonna di mercurio nel cannello di un termometro, l'arco più o meno grande descritto dai pendolini di un elettroscopio fanno conoscere i cangiamenti avvenuti nel potere calorifero ed in quello dell'elettrico. Al contrario, base di tutti i *fotometri*, ossia strumenti misuratori della luce, è la sensazione visiva, poichè tutti suppongono che l'occhio possa definire l'esatta eguaglianza di due azioni lucide. Ma se questo principio è appena ammissibile rispetto alle irradiazioni che provvengono da sorgenti simili, non può valere per quelle che muovono da fonti di diversa natura, stante che l'occhio come in seguito avremo ad osservare, non sente egualmente

[1] Facciamo $BE=a$, $CE=x$, quindi $BC=\sqrt{a^2+x^2}$. Ponendo $=1$ l'intensità lucida di C per l'unità di distanza e sopra una superficie eguale ad AB, essa sarà $\frac{1}{a^2+x^2}$ alla distanza CB. E poichè i raggi incontrano l'elemento AB sotto l'angolo CBE, il cui seno è $\frac{CE}{CB}=\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}}$, così l'illuminazione di AB sarà rappresentata da:

$$\frac{x}{(a^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}=x(a^2+x^2)^{-\frac{3}{2}}.$$

Prendendo di questa funzione la derivata rispetto ad x e pareggiandola a zero, si avrà l'equazione:

$$a^2-2x^2=0\text{ , donde } x=a\sqrt{\tfrac{1}{2}}=0,707a.$$

le irradiazioni diversamente colorate, come di ordinario son quelle che ci vengono da sorgenti diverse.

Intanto, ammesso che sia il suddetto principio, la legge della ragione inversa dei quadrati delle distanze compirà la misura della intensità lucida. Così appunto agiscono i fotometri di Rumford, di Ritchie, di Bunsen.

Il metodo fotometrico di Rumford consiste nel porre a tali distanze da un corpo opaco le sorgenti luminose da comparsi, che le ombre proiettate sopra uno stesso piano risultino egualmente oscure: con ciò le intensità delle due luci si avranno direttamente proporzionali ai quadrati delle loro distanze dal piano di proiezione. Sia MN (Fig. 307*c*) questo piano, e C il corpo opaco che proietta le due ombre *a* e *b*, intercettando i raggi che vengono dalle due sorgenti A e B. Essendo l'ombra *a* in parte rischiarata dalla luce di B, come l'ombra *b* lo è dalla luce di A, è chiaro che le due ombre non potrebbero riuscire egualmente oscure, se la luce inviata da A su *b* non fosse eguale a quella che B irridia su *a*. Percio indicando con φ e φ_1 le intensità delle due luci per l'unità di distanza, e ponendo la distanza $pq=d$ e la $st=d_1$, avremo l'equazione:

$$\frac{\varphi}{d^2}=\frac{\varphi_1}{d_1^2}, \text{ donde } \varphi:\varphi_1=d^2:d_1^2.$$

Il fotometro poi di Ritchie consiste in una cassa parallelepipeda, interiormente annerita ed aperta nelle due basi (Fig. 299). Nel suo mezzo stanno i due specchietti piani P e Q, inclinati di 45° all'asse del parallelepipedo, e congiunti nella linea F, che divide in parti eguali una fenditura rettangolare AB fatta sul fondo superiore della cassa e chiusa con vetro spulito o con carta traslucida. Le luci da compararsi si porranno normalmente alle due basi della cassa, ed a tali distanze da far riuscire egualmente illuminate le due zone del setto AB per l'irradiazione inviatavi dagli specchi. In questo fotometro, egualmente che in quello di Rumford, le intensità delle due luci saranno direttamente proporzionali ai quadrati delle loro distanze dal centro della cassa.

Di un merito pratico assai più grande è il fotometro ideato da Bunsen. Il suo pezzo principale è un telarino circolare chiuso da un disco di carta, nel cui centro evvi una macchia fatta con una goccia di cera o di stearina. Guardando la carta per luce riflessa, la macchia centrale si vedrà oscura sopra un fondo chiaro, e vedendola per luce trasmessa apparirà chiara sopra un fondo oscuro. Quindi se dai due lati della carta ed in linea retta col centro della macchia sieno a tali distanze situate due luci da rendere invisibile quella macchia, allora si avrà la certezza che la carta è egualmente illuminata nelle due facce, e basterà prendere la ragione dei quadrati di quelle distanze per conoscere come sieno tra loro le forze delle rispettive sorgenti luminose.

Celerità della luce.

321. Cartesio in conseguenza di una sua ipotesi sul moto della luce la riguardava come infinitamente veloce, e credeva poter confermare questo suo concetto coll'esempio delle eclissi lunari, per le quali il calcolo e l'osservazione coincidono a capello, quantunque non si tenga conto del tempo che la luce dovrebbe impiegare per venire dalla luna a noi, se mai avesse una velocità misurabile. Gli accademici del Cimento si servirono dello sparo delle arme da fuoco, veduto a grande distanza, per osservare se mai vi fosse stata sensibile differenza di tempo tra l'istante convenuto per dar fuoco all'arma, e quello in cui appariva la fiamma; ma l'enorme velocità della luce fè riuscire coincidenti i due tempi. Il primo ad osservare gli effetti del moto progressivo della luce fu l'astronomo danese Roëmer nel 1675, e ciò per mezzo delle eclissi del 1° satellite di Giove. Questo satellite compie il suo giro intorno al pianeta primario in 42°,28^{m},35^{s}; ed in ogni giro si occulta nell'ombra del pianeta, indi n'emerge. Or la terra facendo presso che dodici giri intorno al sole, mentre Giove ne compie un solo, avviene che in ogni anno la prima si trovi una volta alla massima, un'altra alla minima distanza dal secondo; ed in conseguenza se la velocità della luce fosse infinita, alcun divario non dovrebbe correre tra gl'istanti delle successive occultazioni di quel satellite, in qualunque delle suddette posizioni del nostro

pianeta venissero osservati. Roëmer vi trovava in vece un successivo ritardo, quando la terra moveva dalla minima alla massima distanza da Giove, ed una progressiva anticipazione nel resto del suo moto, e la differenza comparatamente alle posizioni estreme del nostro pianeta rispetto all'altro riuscì di $16^m,26^s$. Ecco il tempo che la luce solare impiega nel percorrere il diametro dell'orbita terrestre, vale a dire una lunghezza di meglio che 160 milioni di miglia italiane.

Roëmer non solamente scovrì il moto progressivo della luce, ma lo fè conoscere ancora uniforme. Supponendo che così fosse, egli nel settembre del 1676 annunziava che nel prossimo novembre le occultazioni del 1° satellite di Giove sarebbero avvenute 10 minuti più tardi, ed il fatto riuscì conforme al risultamento del calcolo. Laonde se la luce impiega $16^m,26^s$ per correre l'intero diametro dell'orbita terrestre, non richiederà che 8^m circa per venire dal sole a noi, ed in conseguenza la sua velocità è di quasi 170000 miglia italiane per ogni secondo. Alquanto più grande di questo numero è la distanza che ci separa dalla luna; quindi da questo satellite la luce verrà alla terra in poco più di un secondo, e perciò tra il reale cominciamento di un'eclissi lunare e quello assegnato dal calcolo, che non tenga conto del moto della luce, non può esservi differenza sensibile.

Uno dei più belli trovati dell'Ottica moderna è certamente quello di aver potuto misurare la celerità della luce sopra piccoli intervalli. Una serie di sperimenti di questo genere fu fatta primieramente in Francia da Fizeau mercè l'apparecchio rappresentato dalla fig. 293. Due cannocchiali L ed L' stavano situati alla mutua distanza di 8633 metri, ed in modo che l'immagine della lente obbiettiva dell'uno si vedesse nel foco dell'altro; la qual cosa significava una direzione comune negli assi dei due strumenti. Il cannocchiale L comunicava lateralmente con un tubo provveduto di due lenti convergenti, destinati a far sì che i raggi partiti dalla sorgente luminosa, che nella fig. è indicata da una stella, divenissero paralleli prima d'incontrare la lastra G inclinata di 45° sull'asse del can-

nocchiale. La lastra riverberava gran parte della luce incidente, ed i raggi riflessi secondo la direzione comune ai due strumenti, incontravano normalmente la superficie dello specchio piano M situato nel foco del cannocchiale L'; e di là, ritornando per la stessa via, incontravano di nuovo la lastra G e per mezzo di questa pervenivano all'occhio dell'osservatore situato all'oculare del cannocchiale L. Sulla linea che i raggi luminosi dovevano percorrere andando e venendo da un cannocchiale all'altro, stava la ruota R provveduta di 720 denti, e che per mezzo di apposito congegno poteva prendere un rapido movimento di rotazione intorno al suo asse. Se il tempo, che un raggio luminoso impiegava per andare da G ad M e poi rivenire a G, si trovava minore di quello che bisognava all' intervallo di due denti per attraversare il cammino della luce, allora l'occhio dell'osservatore vedeva attraverso l'oculare l'immagine della sorgente riflessa dallo specchio M; ma se il primo tempo riusciva minore del secondo, il raggio ch'era passato per l'intervallo di due denti nel suo moto da G verso M, incontrava uno dei due denti nel suo ritorno, e l'osservatore vedeva eclissata la sorgente luminosa. Negli esperimenti di Fizeau si ebbe una prima eclisse quando la ruota faceva giri 12, 6 per ogni secondo; sotto una velocità doppia riapparve l'immagine della sorgente, che poi venne dinuovo ad eclissarsi per mezzo di una velocità tripla. Il moto della luce fu dunque uniforme; e la sua velocità dedotta dalla discussione di 28 osservazioni fatte dal fisico francese risultò poco diversa da quella calcolata per mezzo delle eclissi del 1° satellite di Giove.

Aberrazione degli astri.

322. Rappresenti A (Fig. 296) l'occhio di un osservatore, e B la pupilla per la quale fingiamo ch'entri il raggio luminoso *ab*. Se questo raggio incontra il fondo dell'occhio in *b*, quando l'osservatore è in riposo, egli è chiaro che dovrebbe incontrarlo in un altro punto *c*, se l'osservatore nella direzione indicata dalla freccia si movesse con una velocità comparabile a quella della luce. Or dall'insieme dei fenomeni di visione si rileva che il luogo apparente di un oggetto è sempre sulla retta che congiunge il centro della pupilla col punto, in cui la

luce inviata dall'oggetto incontra il fondo dell'occhio; in conseguenza il luogo apparente dell'oggetto si troverà sulla *ba* quando l'osservatore non si muove, e si troverà invece sulla *ce*, quando nella direzione indicata dalla freccia sarà trasportato con una velocità comparabile a quella della luce. E si osservi che la Be, sulla quale è il luogo apparente dell'oggetto nella seconda ipotesi, va per la diagonale del parallelogrammo costrutto sulle due rette B*a* e B*s*, le quali rappresentano in grandezza e direzione la velocità della luce e quella dell'osservatore; ed in conseguenza se questa sia presso che nulla rispetto all'altra, come avviene di tutti i movimenti che possiamo ricevere sulla superficie terrestre ed anche di quello comunicatoci dalla rotazione diurna del nostro pianeta, allora il luogo apparente dell'oggetto riuscirà indipendente dalla condizione di moto o riposo del sistema.

Ma non è così della velocità impartitaci dal moto annuo del nostro pianeta. Essa è presso che 10188 volte minore di quella della luce solare; e ponendo che di ogni altra stella la luce sia egualmente celere, avremo nel triangolo B*es*;

$$\text{sen}\,Bes : \text{sen}\,eBs = 1 : 10188\,,$$

donde:
$$\text{sen}\,Bes = \frac{1}{10186}\,\text{sen}\,eBs.$$

Or l'angolo *e*B*s* è prossimamente eguale all'angolo *a*B*s* che la direzione del raggio luminoso forma con quella del moto annuo della terra; ed in conseguenza allorchè questo raggio si troverà normale all'orbita terrestre, sarà $\text{sen}\,aBs = 1$ e l'angolo B*es* prenderà il suo valore massimo di $20'',253$, risultante dall'equazione $\text{sen}\,Bes = \frac{1}{10188}$. Al contrario ponendo che sia $aBs = 0°$, vale a dire che il raggio luminoso sia tangente l'orbita terrestre, sarà $\text{sen}\,Bes = 0$, quindi $Bes = 0°$ ovvero $= 180°$ e l'aberrazione riuscirà nulla.

Premesso ciò, immaginiamo una stella *s* (Fig. 297) nel piano dell'orbita terrestre *abcd*. Quando la terra sarà nel punto di contatto *a* della sua orbita col raggio luminoso *sa*, l'osser-

vatore vedrà la stella nel suo vero luogo *s*, essendo allora nulla l'aberrazione; e poichè questa va crescendo col progredire della terra verso il punto *b* in cui la sua orbita incontra ad angolo retto il raggio di luce *sb*, così il luogo apparente dell'astro dovrà descrivere nello stesso tempo e parallelamento al piano dell'eclittica la linea *sz* di 20",253. Dal punto *b* in poi l'aberrazione andrà decrescendo, e l'astro si vedrà ritornare verso *s*, ed ivi pervenire quando la terra avrà raggiunto il punto di contatto *c* della sua orbita col raggio luminoso *sc*. E come il nostro globo avrà oltrepassato il punto *c*, l'aberrazione si produrrà in senso opposto, e l'astro sembrerà camminare verso *v*, ed ivi giungere quando la terra sarà pervenuta nel punto *d*, in cui il raggio *sd* è pur esso perpendicolare alla curva terrestre. Nuovo ritorno dell'astro in *s* avrà luogo contemporaneamente a quello della terra in *a*; e così nel corso di un anno la stella andrà da *v* in *z* e ritornerà da *z* in *v*, oscillando per un arco di 40",5.

Or poniamo che la stella invece di essere nel piano dell'eclittica, giacesse nel polo di questo cerchio massimo della sfera celeste. Allora l'angolo formato dal raggio di luce con qualsiasi elemento dell'òrbita terrestre sarebbe costantemento di 90°, e l'aberrazione avrebbe sempre il valore di 20",253; ma poichè quell'angolo roterebbe intorno all'asse dell'eclittica seguendo il moto annuo della terra, così l'astro nello stesso tempo dovrebbe descrivere intorno al suo vero sito come centro un cerchio parallelo all'eclittica e del diametro di 40",5. Or per latitudini decrescenti da 90° a 0° questo cerchio non potrà trasformarsi in una retta lunga quanto il diametro senza assumere le forme di tutte le possibili ellissi che avendo l'asse maggiore costantemente di 40",5, abbiano l'asse minore decrescente da 40",5 a 0°.

Nel corso di un anno dunque dovremo vedere tutti gli astri apparentemente descrivere delle ellissi più o meno eccentriche, ma tutte aventi un asse maggiore parallelo al piano dell'eclittica é grande di 40",5. Questa deduzione purtuttavia non è che un corollario delle due ipotesi, il moto annuo della

terra e la costante velocità della luce qualunque ne sia la sorgente. Or l'astronomo inglese Bradley facendosi a ricercare se le stelle avessero o pur no una sensibile paralassi, scovriva nel 1725 il fatto dell'aberrazione quale appunto risulta dalle due suddette ipotesi. Questi due concetti sono dunque tutti due reali, vale a dire che la terra *realmente* si aggira intorno al sole, e la luce ha *realmente* una velocità indipendente dalla natura del corpo luminoso.

E poichè la luce ha una celerità indipendente dal corpo che ce l'invia, e che essa impiega 8^m e 13^s per venire dal sole a noi, ne segue che quella irradiata dalla stella Sirio, che dista da noi 990000 volte più che il sole, dovrà giungere a noi in un tempo altrettante volte più grande, vale a dire in circa 15 anni. Perciò, mentre in una bella notte ammiriamo Sirio splendente sulla volta del cielo, è possibile che da parecchi anni l'astro più non esista, e che altro tempo dovrà tuttavia decorrere prima che ci venga l'ultimo suo raggio. E chi potrebbe sostenere che in quei mondi stellari, che un inconcepibile distanza ci fa vedere sotto forma di nebulose, non esistano stelle il cui primo raggio non sia ancora giunto all' occhio dell'uomo?

CAPO SECONDO.

DELLA RIFLESSIONE SPECULARE.

323. Ogni corpo, che non ha luce propria, si rende visibile riverberando quella che riceve dal sole o da altro corpo luminoso. Se in questo rimbalzo, come in seguito dimostreremo, tutti gli elementi della luce vengono inviati secondo una stessa ragione, il corpo apparirà bianco o nero, secondochè l'irradiazione incidente sarà in massima parte riverberata o assorbita; e si vedrà invece diversamente colorato, se uno o più elementi luminosi patiscano un assorbimento maggiore che negli altri. Diffusione e riflessione.

Ed oltre a questa perdita più o meno grande che i raggi soffrono nell'esser riverberati dai corpi che incontrano, è da considerarsi ancora la direzione che prendono nel rimbalzo. Se questo avviene con superficie più o meno scabre, i raggi saranno riverberati per ogni verso indistintamente, ma se la superficie in cui s'imbattono, ha quel finito pulimento che si vuole in uno specchio, allora la luce rinviata non solamente ha lo stesso colore della luce incidente, ma segue ancora una definita direzione. Così quando nell'interno di una stanza buia penetra un fascetto di raggi solari, quel cerchietto di luce che essi dipingono sull'opposta parete diffonde nello spazio ambiente un debole chiarore, che nasce da una riverberazione attuata in ogni verso; ma se i raggi invece della ruvida superficie della parete avessero incontrata quella di un ottimo specchio, sarebbero stati tutti riflessi in una sola direzione, e sarebbero andati a dipingere sopra una seconda parete quel cerchietto di luce che senza lo specchio avrebbero segnato sulla prima.

Questi due modi di riverberazione lucida sono distinti coi nomi di *diffusione* e *riflessione speculare*. Mercè la prima vediamo l'oggetto da cui la luce ritorna, colla seconda vediamo l'immagine di quello da cui parte.

Legge della riflessione speculare.

324. Abbiamo detto che nella riflessione speculare la luce è tutta rinviata in una sola direzione. Or questa direzione è definita dalla seguente legge:

Il raggio riflesso è sempre nel piano definito dal raggio incidente e dalla normale alla superficie riflettente nel punto d'incontro, e fa con essa normale un angolo eguale a quello che vi forma il raggio incidente.

Questa legge, rifermata dai fenomeni che presentano gli specchi sì piani che curvi, può esser intanto chiarita col seguente sperimento. Si abbia un cannocchiale (Fig. 300) mobile intorno al centro di un cerchio graduato; e posto verticalmente questo cerchio si miri per l'asse del cannocchiale ad una stella, e si legga sul cerchio il valore dell'angolo *lon* che il raggio visuale farà colla verticale *ol*; indi s'inclini il can-

nocchiale verso il suolo finchè in una certa direzione *st* non si vegga riflessa dal mercurio, ivi appositamente situato, l'immagine della medesima stella; e si legga l'angolo fatto dal raggio *st* colla normale *lo*, e si troverà esser l'angolo *lot*=*lon*. Or se le stelle sono così lontane da noi che i raggi da esse inviati ai punti estremi di un diametro dell'orbita terrestre, fanno un angolo ordinariamente insensibile, è chiaro che dovremo riguardare come realmente paralleli i due raggi *nk* ed *ms*, de'quali il primo va per l'asse del cannocchiale, e l'altro incontra la superficie del mercurio in *s*. Ma il piano *ntos* per la disposizione data all' istrumento è normale alla superficie del mercurio, tale sarà ancora il piano *mst*, poichè *nk* è parallela ad *ms*; e così rimane verificata la prima parte della legge sulla riflessione speculare. Per le stesse parallele si ha ancora l' angolo *msz*=*nol*, e *zst*=*lot*: ma l'angolo *lon* si è trovato eguale ad *lot*; sarà dunque *tsz*=*msz*, vale a dire l'angolo di riflessione eguale a quello d'incidenza.

325. Combinando la legge della riflessione speculare col principio che secondo la direzione del pennello di luce che penetra nell'occhio e secondo la maggior o minor divergenza dei raggi che lo compongono noi giudichiamo la posizione dell'oggetto, sarà facile cosa il dichiarare i fenomeni prodotti dagli specchi sì piani che curvi. Ed incominciando dai primi, supponiamo in AB (Fig. 301) il profilo di uno specchio piano, in *m* un centro di luce ed in *o* l'occhio dell'osservatore. Dal punto *m* si abbassi la perpendicolare *mz* al piano AB, e si prolunghi di altrettanto in *m'*: si conduca il raggio *ms*, indi la *m's* prolungata in *t*. Per l'eguaglianza dei due triangoli rettangoli *msz*,*m'sz*, si ha l'angolo *msz*=*m'sz*; ma è *m'sz*=B*st*; sarà dunque B*st*=*msz*, ed eguali ancora saranno i loro complementi *msh*,*tsh*. Il raggio dunque che dalla sorgente *m* muove ad incontrare lo specchio nella direzione *ms*, sarà riverberato secondo *st*; e poichè ciò avviene nell'indipendenza dal valore di *zs*, segue che tutti i raggi che partendo da *m* incontrano lo specchio AB, saranno da questo riverberati in modo che i loro prolungamenti s'incontreranno in *m'*, vale a dire che il fascet-

Specchi piani.

to riflesso *tscv* sarà la continuazione del fascetto incidente *msc*; ed in conseguenza l'occhio dell'osservatore, ovunque situato, purchè riceva dei raggi riflessi da AB, vedrà in *m'* l'immagine di *m*.

Da questa costruzione si deducono a modo di corollarii tutti i fenomeni che accompagnano la produzione delle immagini per mezzo di specchi piani. Ed in vero, supponendo che la stessa costruzione si ripeta per tutti i punti della superficie che sta di fronte allo specchio, si avrà:

— 1° Che essendo ogni pennello riflesso una continuazione del rispettivo pennello incidente, le dimensioni dell'oggetto debbono essere necessariamente riprodotte nella sua immagine.

— 2° Che l'oggetto e la sua immagine debbono essere simmetricamente situate rispetto al piano dello specchio. Quindi è che le immagini delle case, degli alberi ecc. riflesse dalla superficie di uno stagno, presentano altrettante figure capovolte di quegli oggetti. E per la stessa ragione avviene ancora che nella distanza dell'immagine dal piano dello specchio si riproducono gli stessi cangiamenti che avvengono nella distanza dell'oggetto.

— 3° Che ponendo un oggetto *m* (Fig. 302) tra due specchi piani paralleli A e B, si avrà lungo la normale ad essi menata pel punto *m* una serie d'immagini sempre più deboli per la perdita di luce che avviene ad ogni rimbalzo dei raggi. Quelli che da *m* vanno ad incontrare lo specchio A danno mercè una prima riverberazione l'immagine *n*, indi ripercossi da A su B produrranno la seconda immagine *n'*, e così di seguito; e similmente i raggi che incontrano prima lo specchio B, indi da questo sono inviati su A, ecc. daranno luogo alle successive immagini *s*, *s'*, ecc. Quindi si comprende perchè situandoci tra due specchi e guardando su uno di essi, vediamo primieramente l'immagine del nostro viso, indi quella dell'occipite, e via discorrendo.

Ma se gli specchi invece di essere paralleli fossero inclinati sotto un angolo, e poniamo di 60°, come *ac* e *cb* (Fig. 303),

allora la luce inviata da *m*, riflettendosi immediatamente su i due specchi, produce le immagini *n* ed *s*; indi i raggi che tornano da *ac*, giungono allo specchio *cb* come se fossero partiti da *n*, e danno l'immagine *n'*, e similmente si avrà *s'* dai raggi che incontrano *ac* dopo la loro riflessione sopra *cb*. Mercè una terza riflessione si avranno di *n'* ed *s'* due immagini coincidenti in *m'*: con una quarta saranno riprodotte *n'* ed *s'*; da una quinta verranno di nuovo *n* ed *s*; la sesta darà due immagini coincidenti in *m*, e quindi ricomincerà lo stesso periodo. E per mezzo di questa analisi è chiaro che la ripetizione delle stesse immagini non potrebbe aver luogo, se l'angolo formato dagli specchi non fosse parte aliquota di 360°.

Sul fatto delle immagini ripetute da due specchi inclinati tra loro poggia la costruzione del *caleidoscopio* inventato da Brewster. Questo apparecchio, che per la natura stessa dei suoi effetti sembrava non poter servire che ad esperimenti di ricreazione, è divenuto per opera di P. A. De Luca un istrumento utile alle arti del disegno.

— 4° Supponiamo due specchi piani paralleli *ab*, *st* (Fig. 304), e che un raggio di luce *mc* riflesso dal secondo specchio nella linea *ce*, sia riverberato dal primo nella direzione *eo*; è chiaro che sarà il raggio *eo* parallelo ad *mc*. Ciò posto, fingiamo che lo specchio *st* sia girato in *s't'*, finchè un nuovo raggio *nc* ne sia riverberato per la stessa via *ce*, e quindi riflesso da *ab* nella medesima direzione *eo*: allora l'occhio situato in *o* vedrebbe coincidere le immagini di *m* ed *n*. Or chiamando α l'angolo formato dai due raggi *mc* ed *nc*, β l'angolo d'incidenza *mcz* del raggio *mc* sullo specchio *st*, e β' quello dell'incidenza *ncz'* del raggio *nc* sullo specchio *s't'*, avremo:

$$\alpha = nce - mce = 2(\beta' - \beta).$$

Ma, indicando con γ l'angolo *zcz'* formato dalle due normali, si ha:

$$\beta' = \gamma + \beta, \text{ donde } \gamma = \beta' - \beta;$$

ed in conseguenza:

$$\alpha = 2(\beta' - \beta) = 2\gamma.$$

Vale a dire che l'angolo formato dai due raggi *mc* ed *nc* è doppio di quello per cui si è mosso lo specchio *st*. Su questo principio è costrutto il *sestante*, strumento prezioso alla Nautica.

Osserviamo ancora che se dei raggi nella direzione *ec* incontrassero uno specchio piano ora nella posizione *st*, ora nell'altra *s't'*, il deviamento *mcn* avvenuto nella direzione dei raggi riflessi sarebbe doppio di quello patito dal piano dello specchio. Quindi si comprende la ragione di quell'immagine tremula che i raggi solari, riflessi dalla superficie di un'acqua stagnante, vanno a dipingere sulla parete che incontrano.

Specchi sferici.

326. Gli specchi curvi sono per lo più formati a calotte sferiche, le quali secondo che presentano forbita l'una o l'altra superficie, prendono i nomi di *specchi concavi* o *specchi convessi*: la retta menata pel centro della base della calotta e perpendicolarmente a quel piano, costituisce l'asse dello specchio. Premesse le quali cose, poniamo che sia ACB (Fig. 307) la sezione fatta sopra uno specchio concavo da un piano condotto per l'asse C*k*; che *o* sia il centro di curvatura dello specchio, e che in *k* sia un centro di luce. Considerando il raggio luminoso *km*, che supponiamo di fare un angolo assai piccolo coll'asse dello specchio, conduciamo la normale *om* al punto d'incidenza, e quindi la *mk'* che faccia l'angolo $omk'=omk$: sarà k' il punto in cui il raggio riflesso incontrerà l'asse dello specchio. Or nel triangolo kmk' la *mo* dividendo per metà l'angolo *m*, avremo la proporzione:

$$ok : ok' = km : k'm.$$

Nella quale ponendo $Ck=p$, $Ck'=p'$, $om=r$, e considerando esser prossimamente $km=Ck$, $mk'=Ck'$, si ha:

$$p-r : r-p'=p : p' ;$$

donde l'equazione:

$$pr+p'r=2pp',$$

che divisa pel prodotto $pp'r$, diviene:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{2}{r}.$$

Or tutti i raggi che partono da k inclinati all'asse dello specchio sotto un angolo eguale a ckm, andranno ad incontrarsi in k'; e perciò questo punto si denomina *fuoco*. E poichè se i raggi fossero partiti da k' sotto l'angolo $ck'm$ si sarebbero riuniti nel punto k, perciò k e k' si dicono *fuochi conjugati*; le loro distanze ck, ck' dallo specchio sono *distanze focali conjugate*, di cui l'ultima equazione esprime la mutua dipendenza.

In quella equazione poniamo:

— 1°. Che sia $p=\infty$; sarà $\frac{1}{p}=0$, quindi $p'=\frac{1}{2}r$. L'ipotesi di $p=\infty$ si verifica nel caso di un'irradiazione parallela all' asse dello specchio; e poichè in questo caso si ha $p'=\frac{1}{2}r$, è chiaro che i raggi i quali vanno paralleli all' asse dello specchio, hanno il loro fuoco nel punto medio del raggio di curvatura. Questo punto si denomina *fuoco principale* dello specchio.

— 2°. Che sia $p=\frac{1}{2}r$; sarà $\frac{1}{p'}=0$, quindi $p'=\infty$. Vale a dire che se il centro di luce è nel fuoco principale, i raggi luminosi saranno riverberati parallelamente all' asse.

— 3°. Che sia $p=\frac{1}{2}r-\alpha$, α rappresentando ogni valore >0 e $<\frac{1}{2}r$. In questa ipotesi avremo $p'=-\frac{(\frac{1}{2}r-\alpha)r}{2\alpha}$, valore essenzialmente negativo, stante che sarà sempre $\frac{1}{2}r>\alpha$. Questo valore negativo indica che il fuoco k' (Fig.307*a*) giace dall'altro lato dello specchio, e che in conseguenza i raggi luminosi ne sono riverberati in direzioni, come mn, divergenti dall'asse. Il fuoco k' dunque non esiste che matematicamente, e perciò è denominato *fuoco virtuale*, a differenza dei veri punti d' incontro dei raggi, che sono *fuochi reali*.

Da ciò si rileva che il fuoco dei raggi riflessi da uno specchio concavo sarà sempre virtuale, quando la sorgente luminosa va dalla superficie al fuoco principale dello specchio, ed in vece sarà reale quando la sorgente va dal fuoco principale all' infinito.

Osserviamo ancora che l' equazione ottenuta rispetto agli

specchi concavi, è applicabile tanto agli specchi piani che ai convessi. Basterà che pei primi si faccia $r=\infty$, donde si avrà $p'=-p$, vale a dire che l' immagine del punto luminoso si troverà simmetricamente situata dall' altro lato dello specchio. E quanto agli specchi convessi, mutando il segno di r ne avremo l'equazione:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=-\frac{2}{r},$$

dalla quale risulta p' negativa finchè p sarà positiva: vale a dire che a qualunque distanza da uno specchio convesso sia situato un punto raggiante, il suo fuoco conjugato sarà sempre virtuale.

Poniamo ora che in vece di un punto solo sia presentato ad uno specchio sferico un sistema di punti raggianti, ossia un oggetto con dimensioni finite. Ogni punto della sua superficie, voltata allo specchio, avrà il suo fuoco corrispondente, e nel sistema dei fuochi starà l' immagine dell'oggetto.

Cominciando dagli specchi concavi, osserviamo che indicando con h ed h' le distanze ko e $k'o$ (Fig. 307) di due fuochi conjugati dal centro o di curvatura dello specchio, la proporzione ottenuta nel principio di questo paragrafo ci darà, nell'ipotesi che sieno prossimamente $km=ck$ e $k'm=ck'$, la relazione:

$$h'=\frac{hr}{2h+r}.$$

Premesso ciò, supponiamo che ab (Fig. 292) sia l'oggetto situato innanzi allo specchio concavo cd ad una distanza maggiore di quella del suo fuoco principale, e che pei punti estremi a,b e pel centro di curvatura o siano condotte le due rette ac,bd. Queste linee saranno due *assi secondarii*, su i quali andranno a riunirsi i pennelli luminosi che partiti da a e b incontreranno la superficie dello specchio in c e d. Quindi se a' e b' sono i fuochi conjugati di a e b, il primo di questi due punti avrà la sua immagine in a' ed il secondo in b'. Ripetendo la stessa costruzione rispetto a tutti gli altri punti del-

l'oggetto, che guardano lo specchio, si avrà in $a'b'$ la sua immagine. La quale non solamente è capovolta, ma è ancora più piccola dell'oggetto, stante che dall'equazione precedente risulta essere $h'<h$, e che dai due triangoli simili $aob, a'ob'$ si ha la proporzione:

$$ab : a'b' = h : h'.$$

E poichè dalla stessa equazione risulta ancora esser h' tanto più piccola rispetto ad h, per quanto la stessa h è più grande, è chiaro che l'immagine andrà impiccolendo come l'oggetto sarà più lontano dallo specchio.

Ma se l'oggetto come ab (Fig. 305) in vece di esser situato al di là del fuoco principale, giacesse tra questo fuoco e la superficie dello specchio, allora considerando che i raggi as ed at partiti dal punto a, sarebbero rimbalzati secondo le linee divergenti sh e tg, è chiaro che l'occhio dell'osservatore li riceverebbe come se venissero dal loro foco virtuale a', e che quivi vedrebbe l'immagine del punto a. Similmente b darebbe la sua immagine in b', e quella dell'oggetto ab risulterebbe diritta ed ingrandita.

Con una simile costruzione si troverà ancora che le immagini prodotte dagli specchi sferici convessi debbono riuscir sempre virtuali, diritte ed impiccolite.

Osserviamo infine che tutte le cose finora dette intorno agli specchi sferici suppongono che mk' e ck' (Fig. 307) siano prossimamente eguali, vale a dire che l'arco generatore dello specchio abbia un piccolo valore angolare, Se così non fosse, i raggi che vanno lontani dall'asse avrebbero fuocó diverso da quello dei raggi che gli stanno vicini; e perciò avviene che l'immagine del sole, dipinta nel fuoco principale di uno specchio concavo, e che per gli esposti principii dovrebbe risultare quasi che un punto geometrico, prende in vece la forma di un cerchietto lucido, il quale ha una certa ragione di grandezza col raggio di curvatura dello specchio e colla sua ampiezza angolare. Questa diversità di fuoco, cui soggiacciono i raggi che partiti da un medesimo centro di luce, sono diver-

samente inclinati all'asse di uno specchio sferico,ne costituisce l' *aberrazione*, che tanto nuoce alla nettezza e simiglianza dell' immagine.

Specchi cilindrici e conici.

327. Gli specchi cilindrici e conici conservano nelle immagini le dimensioni dell'oggetto prese secondo piani menati per l'asse del cilindro o del cono, ma rendono più o meno alterate quelle che stanno in piani perpendicolari ai primi. Queste alterazioni, maggiori negli specchi conici che nei cilindrici, hanno dato origine al curioso problema delle *anamorfosi*, ossia alla ricerca della figura da disegnarsi sopra un piano, perchè riflessa da uno specchio conico o cilindrico, lasci vedere nell'immagine prodotta la forma regolare di un qualche obbietto noto. Per darne un' idea, sia *cev* (Fig. 308) la sezione fatta sopra uno specchio conico da un piano condotto per l'asse, e *cv* l'intersezione del piano secante con quello della base del cono; ponendo che l'occhio dell'osservatore sia in un punto *o* dell'asse prolungato, si cerca l'immagine della retta *cm*, riflessa dal lato *ce* del cono. Essendo questo lato un elemento di specchio piano, i punti *n*,*s*,*m* della retta data avranno le loro immagini in n',s',m', ed in conseguenza cm' sarà l'immagine di *cm*. Se dunque immagineremo sul piano della base del cono descritto un cerchio ad essa concentrico e col raggio *zm*, tutti i punti di questa circonferenza appariranno all'occhio dell'osservatore situato in *o*, come un punto solo giacente in m', e basta questo solo risultamento per mostrare quanto diversa dall'immagine, che si vuole, debba riuscir la figura da diseguarsi sul piano.

CAPO TERZO.

DELLA RIFRAZIONE SEMPLICE.

Definizione.

328. Se dopo aver collocata una moneta in A (Fig. 310) sul fondo di un bacino ed esserci allontanati finchè non potrèmo più vederla, facciamo empire quel bacino di acqua, vedremo

immediatamente la moneta apparire in A', come se il fondo su cui riposava si fosse elevato. Questo apparente innalzamento del fondo dimostra che i raggi luminosi partiti dalla moneta, hanno deviato dal loro cammino nel passare dall'acqua nell'aria, ed han fatto colla normale al punto di emersione un angolo più grande di quello della loro incidenza sulla superficie dell'acqua.

E se i raggi movessero viceversa dall'aria nell'acqua, patirebbero un opposto deviamento, vale a dire che penetrando nel liquido farebbero colla normale al punto d'immersione un angolo minore di quello della loro incidenza. Di questo fatto potremo assicurarci per mezzo di un semplicissimo sperimento. Sopra una tavoletta *ab* (Fig. 311) poggia una piccola cassa cubica, fatta con cinque lastre di cristallo, di cui una serve di fondo; e questa cassa entra nella tavoletta *cd*, perpendicolare alla prima, per quanta è la doppiezza della lastra che vi sta a contatto. Collocato questo piccolo apparecchio sopra una tavola colla faccia esterna di *cd* voltata ai raggi solari, ed empita d'acqua la cassa, si vedrà sul fondo di essa proiettarsi un'ombra meno ampia che sul resto del piano *ab*. Ciò dimostra chiaramente che la luce passando dall'aria nell'acqua si è *rifratta* facendosi più dappresso alla normale d'incidenza.

Ed in generale un raggio di luce si rifrange allorchè passa da un mezzo in un altro di diversa densità; e la nuova via che segue, rimanendo sempre nel piano d'incidenza alla superficie di separazione dei due mezzi, forma colla normale al punto d'incontro un angolo maggiore o minore di quello d'incidenza, secondo che la densità del secondo mezzo sarà viceversa minore o maggiore di quella del primo.

Giova intanto osservare che la speciale natura dei mezzi può invertire la ragione che le loro rispettive densità hanno cogli angoli d'incidenza e rifrazione. Così si vede la luce vieppiù allontanarsi dalla normale al punto d'incidenza, allorchè passa dall'acqua nell'acido solforico, quantunque il primo liquido sia meno denso del secondo. In generale i mezzi combustibili rifrangono più fortemente la luce; e Newton dietro la scoverta

di questo fatto predisse che l'acqua, allora riguardata come elemento, ed il diamante annoverato tra le pietre, dovessero contenere principii combustibili. Più tardi la Chimica scopriva l'idrogeno nell'acqua, e trovava nel diamante un puro carbone.

Legge di Cartesio.

329. L'angolo di rifrazione sia più grande o più piccolo di quello d'incidenza, starà sempre tra essi una certa relazione, che ci permetterà di determinare uno dei due angoli quando l'altro sia dato. Questa relazione che Cartesio deduceva dalle sue idee sistematiche sulla natura della luce, e che la scienza ha poi rigorosamente verificata nelle stesse conseguenze, trovasi formolata nel seguente teorema:

I seni degli angoli d'incidenza e rifrazione per due dati mezzi, stanno tra loro in un rapporto costante.

Dimodochè rappresentando con i l'angolo d'incidenza, con r quello di rifrazione e con n il rapporto costante dei loro seni, la legge di Cartesio si traduce nell'equazione:

$$\operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r.$$

Il rapporto costante n, denominato ancora *indice di rifrazione*, sarà espresso da un numero maggiore o minore dell'unità, a misura che il secondo mezzo sarà più o meno rifrangente del primo.

Or dall'equazione precedente risulta:

— 1°. Che ponendo $i=0$, sarà $r=0$ ovvero $r=180°$; vale a dire che il raggio incidente secondo la normale alla superficie rifrangente entrerà nel secondo mezzo senza deviare dal primo cammino, o tornerà indietro per la stessa via.

— 2°. Che nell'ipotesi di $n<1$, vale a dire nel caso che il passaggio abbia luogo da un mezzo più rifrangente in un altro che lo è meno, sarà sempre $r>i$; ed in conseguenza nel limite $r=90°$ sarà tuttavia i un angolo acuto, definito dalla relazione $\operatorname{sen} i = n$. Or se poniamo $i > \operatorname{arc} \operatorname{sen} n$, l'equazione cartesiana per esser soddisfatta richiederebbe $\operatorname{sen} r > 1$, ciò ch'è impossibile; in conseguenza se il principio tradotto in quella equazione è sempre vero, la luce non potrà penetrare nel mez-

zo meno rifrangente ogni volta che sia $i > \text{arc sen}\, n$. Or questa illazione è confermata dal seguente fatto. Una vaschetta parallelepipeda AB (Fig. 312) di legno od altra sostanza opaca, è piena di acqua ed in parte chiusa superiormente. In questa porzione di coperchio trovasi un foro pel quale passa il collo di un matraccetto di vetro, contenente una candela accesa e così alta che la luce irradiata dalla fiamma non può incontrare la superficie dell'acqua, nella parte libera da coperchio, sotto un'incidenza che sia minore di arc sen n. Così i raggi luminosi non potranno pel principio cartesiano uscire dall'acqua, e nel fatto si troverà la fiamma esser invisibile attraverso il liquido, qualunque sia il punto da cui si guardi.

L'angolo d'incidenza $i = \text{arc sen}\, n$ che rende impossibile il passaggio della luce da un mezzo in un altro meno rifrangente, si denomina *angolo limite*. E sotto questo angolo la rifrazione è trasformata in una totale riflessione speculare, come risulta dal seguente sperimento. Sul fondo di un bicchiere piuttosto largo si depongano dei piccoli oggetti, e vi si versi dell'acqua: tenendo il bicchiere alquanto più alto dell'occhio, si troverà facilmente una posizione nella quale le immagini degli oggetti giacenti sul fondo appariranno riflesse dalla superficie del liquido, con un grado di luce ed una precisione di forma che si attenderebbero in vano dallo specchio meglio forbito.

— 3.° Ponendo $n > 1$, vale a dire che la luce passi da un mezzo in un altro più rifragente, avremo che r sarà sempre un angolo acuto, il cui massimo valore corrisponderà ad $i = 90°$ e sarà dato in conseguenza dall'equazione $r = \text{arc sen}\, \frac{1}{n}$.

Perciò se immaginiamo un osservatore che avesse l'occhio in un punto o (Fig. 313) sotto al livello mn di una massa di acqua, allora conducendo la ok inclinata alla normale kz per quanto è il massimo valore di r, un cerchio avente il centro c ed il raggio ck segnerebbe sulla superficie dell'acqua il limite d'incidenza dei raggi che rifratti dal liquido potrebbero pervenire all'occhio dell'osservatore. Quel cerchio limiterebbe il

campo dell' orizzonte sensibile rispetto agli oggetti esistenti fuori dell' acqua; e dai punti della rimanente superficie di livello, come m, t, n ecc. non potrebbero venire in o se non i raggi, che partiti dagli oggetti esistenti sul fondo dell'acqua, fossero ivi riverberati.

Prisma. 330. Supponiamo che un prisma triangolare di sostanza trasparente sia tagliato da un piano perpendicolare ai suoi spigoli, e che in questo piano, determinante la *sezione principale* del prisma, un pennello di luce vada ad incontrare una delle sue facce. Conoscendo l'angolo d'incidenza del pennello e l'angolo diedro del prisma che deve attraversare e che perciò si nomina *angolo rifrangente*, facciamoci a determinare la via che il pennello seguirà nell'emergere dall' altra faccia dello stesso angolo.

Sia ABC (Fig. 315) la sezione principale, ed ms il pennello incidente sulla faccia AB del prisma sotto l'angolo x. Conducasi la st che faccia colla normale al punto s l'angolo y definito dall'equazione $\operatorname{sen} x = n \operatorname{sen} y$, e si determini l'angolo y' che la stessa st forma colla normale al punto t; ed infine si meni la tn inclinata alla stessa normale per l'angolo x' dato dall'equazione $\operatorname{sen} x' = n \operatorname{sen} y'$: sarà st la via seguita dal pennello nell'interno del prisma e tn quella che terrà nell'uscirne.

Or nel quatrilatero $Aszt$ essendo supplementarii gli angoli A e z, l' angolo esterno che il prolungamento di sz o tz darà al triangolo stz, sarà eguale all'angolo rifrangente A del prisma; e quindi si avrà:

$$y' = A - y \text{ ed } n \operatorname{sen} y' = n \operatorname{sen}(A - y)$$
$$= n \operatorname{sen} A \cos y - n \operatorname{sen} y \cos A$$
$$= \operatorname{sen} A \sqrt{n^2 - n^2 \operatorname{sen}^2 y} - n \operatorname{sen} y \cos A.$$

Ma abbiamo $n \operatorname{sen} y' = \operatorname{sen} x'$ ed $n \operatorname{sen} y = \operatorname{sen} x$; quindi sostituendo otterremo:

$$\operatorname{sen} x' = \operatorname{sen} A \sqrt{n^2 - \operatorname{sen}^2 x} - \cos A \operatorname{sen} x.$$

L'angolo di emergenza x' dipende dunque dall'angolo d'incidenza x, dall'angolo rifrangente A del prisma e dall'indice

n di rifrazione. Quindi se la luce si componesse di raggi inegualmente rifrangibili, quelli che in un fascetto andassero paralleli ad incontrar una delle facce dell'angolo rifrangente, emergerebbero divergenti dall'altra, ed i più rifrangibili farebbero angolo maggiore colla normale al punto di emergenza.

Or se ai raggi solari che per un piccolo foro entrano in una stanza oscura, si opponga un limpido prisma di cristallo e si riceva sopra una parete bianca il fascio luminoso che n'emerge, si vedrà ivi dipinta un' immagine allungata del sole denominata *spettro solare*, la quale apparirà divisa in sette zone parallele agli spigoli del prisma, e distinte dai colori; *rosso, arancio, giallo, verde, azzurro, indaco, violetto*. E questa successione di colori andrà sempre diretta dal vertice verso la base dell' angolo rifrangente, dimodochè l'angolo formato colla normale al punto di emergenza sarà minimo pei raggi rossi e massimo pei violetti.

Ma se le due facce per cui la luce entra ed esce dal mezzo rifrangente, anzichè formare un angolo diedro fossero tra loro parallele, allora dall'equazione di sopra trovata, e che stabilisce la dipendenza tra gli angoli x ed x', posto $A=0$, ed in conseguenza sen $A=0$ e cos $A=1$, avremmo sen $x'=-$sen x qualunque sia il valore di n. Ciò vuol dire che i raggi luminosi passando per un mezzo omogeneo terminato da piani paralleli, emergeranno da una delle sue facce in direzioni parallele a quelle con cui avranno incontrata l'altra faccia; quindi se i raggi sono stati indivisi nell'incidenza, indivisi ancora saranno nella emergenza.

331. Se un pennello di luce incontrando la faccia AB (Fig. 315) di un prisma di cristallo nella direzione *ms*, emergesse dalla faccia AC nella direzione *tn*, l'occhio dell'osservatore ricevendo questo pennello vedrebbe l'oggetto secondo *nk* e quindi alterato di sito per quanto è l'angolo *kom* formato dai due pennelli incidente ed emergente. Questo angolo, denominato *angolo di deviamento*, come esterno del triangolo *sot* sarà eguale alla somma dei due interni *ost* ed *ots*; ma è l'angolo $ost=x-y$, ed $ots=x'-y'$; sarà dunque l'angolo di devia- **Deviamento minimo.**

mento: $D = x + x' - (y + y')$.

Or il calcolo dimostra che l'angolo **D** ammette un valore minimo, e che questo valore ha luogo quando l'angolo di emergenza x' pareggia l'angolo d' incidenza x [1].

E che realmente per l'angolo di deviamento vi sia un valore minimo, lo pruova il seguente sperimento. Fatto entrare un fascetto di raggi solari in una stanza buia, si segni il luogo in cui incontrerà l' opposta parete; indi s' interponga un prisma avente gli spigoli orizzontali e l' angolo rifrangente in basso, e lo si faccia lentamente girare intorno al suo asse orizzontale; si vedrà lo spettro variare di sito sulla parete, toccare una minima distanza dal luogo in cui il pennello diretto

[1] Perchè D sia un minimo, dovrà essere:

$$dD = dx + dx' - dy - dy' = 0.$$

Ma essendo $y + y' = A$, angolo rifrangente del prisma, sarà $dy + dy' = 0$; e dalle due equazioni:

$$\text{sen}x = n\,\text{sen}y\,, \quad \text{sen}x' = n\,\text{sen}y' = n\,\text{sen}(A - y)$$

risulta:

$$dx = \frac{n\cos y\,dy}{\sqrt{1 - n^2\text{sen}^2 y}} \quad \text{e} \quad dx' = -\frac{n\cos(A-y)\,dy}{\sqrt{1 - n^2\text{sen}^2(A-y)}}.$$

Sostituendo questi valori in quello di dD risulta:

$$\frac{dD}{dy} = n\left(\frac{\cos y}{\sqrt{1 - n^2\text{sen}^2 y}} - \frac{\cos(A-y)}{\sqrt{1 - n^2\text{sen}^2(A-y)}}\right) = 0.$$

Quindi l'equazione:

$$\frac{\cos y}{\sqrt{1 - n^2\text{sen}^2 y}} = \frac{\cos(A-y)}{\sqrt{1 - n^2\text{sen}^2(A-y)}},$$

la quale, liberata da fratti e radicali, diviene:

$$\cos^2 y - n^2\cos^2 y\,\text{sen}^2(A-y) = \cos^2(A-y) - n^2\text{sen}^2 y\cos^2(A-y)\,,$$

ossia:

$$\cos^2 y - n^2\cos^2 y + n^2\cos^2 y\cos^2(A-y) = \cos^2(A-y) - n^2\cos^2(A-y) + n^2\cos^2 y\cos^2(A-y)\,;$$

donde: $(1-n)^2\cos^2 y = (1-n^2)\cos^2(A-y)$.

Quindi: $\cos y = \cos(A-y)$;

ed in conseguenza; $y = A - y = y'$.

E l'eguaglianza di y ed y' mena necessariamente a quella di x ed x'.

la incontrava, ed indi allontanarsene quantunque la rotazione del prisma vada sempre procedendo per un medesimo verso.

Analisi dello spettro solare.

332. Una quistione, che naturalmente si presenta osservando lo spettro solare, è quella di sapere se quei raggi diversamente colorati sieno elementi della luce in generale o di quella del sole in particolare. A questa dimanda risponde il fatto che gli spettri delle fiamme, della luce elettrica, ecc. presentano gli stessi colori dello spettro solare, e ne differiscono soltanto per numero ed intensità; dimodochè la diversa proporzione degli elementi prismatici è quella che costituisce la diversità delle sorgenti luminose.

Nè soltanto gli elementi sono gli stessi in ogn'irradiazione lucida, ma si succedono ancora nel medesimo ordine. Quindi è che il grado di rifrangibilità dei raggi di una data specie è un equivalente fisico del loro colore, e lo è in modo così preciso che vale ancora a far distinguere le une dalle altre le diverse falde di raggi componenti una medesima zona. Così di raggi rossi, a modo di esempio, vi ha tante specie diverse, quante sono le linee che parallelamente agli spigoli del prisma si possono condurre nella zona del rosso. Donde segue che ammessa la continuità dello spettro, il passaggio da una zona all'altra dovea riuscire necessariamente insensibile, come quello ch'è determinato dall'infinitesima differenza di rifrangibilità tra gli ultimi raggi della prima zona ed i primi raggi della seconda. Quindi è che i limiti delle diverse zone non potrebbero essere nettamente delineati, senza che lo spettro divenisse discontinuo.

Ed a viemeglio rifermare il concetto che nella sola differenza di rifrangibilità sia da riporsi il carattere distintivo degli elementi prismatici della luce, vengono in acconcio i due seguenti fatti.

Raccolto lo spettro solare sopra un cartone che abbia una stretta fenditura, la si ponga in modo da non far passare che raggi appartenenti ad una sola zona. I raggi così separati dagli altri si facciano incontrare da un secondo prisma che abbia gli spigoli paralleli a quello del primo; e dalla nuova rifra-

zione li vedremo emergere più dispersi ma colorati egualmente che erano. Il colore, che hanno, è dunque elementare in quanto che una maggior separazione dei raggi non vale a risolverlo in altri colori.

Poniamo ora che il cartone in vece di una fenditura ne abbia due, parallele ed abbastanza vicine, perchè senza allontanarle molto dal prisma, facciano passare l'una i raggi medii della zona gialla, l'altra quelli dell'azzurra. Queste due falde di luce si facciano poi incontrare da una lente convessa, dalla quale si vedranno emergere convergenti fino ad incontrarsi. Nel luogo dell'incontro pongasi un corpo bianco, ed ivi vedremo una macchia verde. Ma se i raggi che han dato questo colore s'incontrassero sulla faccia di un secondo prisma, ne uscirebbero divisi in raggi gialli ed azzurri, mentre quelli della zona verde dello spettro sarebbero emersi con identico colore.

Questi due fatti chiaramente ci dimostrano che quando è data la rifrangibilità di un pennello di luce, n'è dato ancora il colore; ma che questo può trovarsi definito senza che l'altra sia egualmente certa.

Righe dello spettro.

333. Le tinte nelle zone dello spettro non appariscono continue che all'occhio nudo; ma se il prisma pongasi innanzi alla lente obbiettiva di un cannocchiale, ed attraverso l'oculare si guardi l'immagine dello spettro prodotta nel tubo dell'istrumento, la si vedrà tagliata da un'infinità di linee nere parallele agli spigoli del prisma, e delle quali alcune sono sottilissime, altre più larghe. Queste linee si appellano *righe dello spettro*.

Wollaston ne scopriva l'esistenza nel 1802. Più tardi Fraunhofer le sottoponeva ad accurato esame, perveniva a numerarne oltre a 600, e tra queste ne distingueva otto indicandole colle lettere A,B,C,D,E,F,G,H. Le righe A,B,C sono nella zona rossa; D sta nel passaggio dall'arancio al giallo; la riga E formata da un gruppo di linee sottili, trovasi nella zona verde; F giace nella zona azzurra, G in quella di color indaco ed H nella zona violetta.

Queste interruzioni nello spettro solare, che per le recenti investigazioni di Kirchhoff sappiamo ascendere a più migliaia, dimostrano che nella luce del sole mancano moltissimi raggi, le cui rifrangibilità sarebbero comprese tra la minima dell'estremo rosso e la massima dell'estremo violetto. I luoghi che questi raggi, che mancano, andrebbero ad occupare nello spettro solare, sono appunto quelli in cui si osservano le linee nere.

La luce dei pianeti offre le stesse righe che quella del sole. La luce delle stelle ne presenta ancora, ma diversamente ordinate che in quella del sole, e varie da una stella all'altra. Al contrario la luce elettrica che si mostra tra due punte di carbone, quella delle fiamme che non contengono neppur atomo di vapore metallico, e quella in fine che viene da solidi non volatili divenuti incandescenti, tutte per mezzo del prisma danno degli spettri perfettamente continui. Ma se in una fiamma siavi ancorchè piccolissima quantità di vapore di un qualche metallo volatile, o che un metallo fisso sia volatilizzato nella scintilla elettrica, allora gli spettri di queste luci cesseranno di esser continui, e presenteranno delle righe che in vece di esser nere, come quelle della luce del sole e delle stelle, si vedranno splendenti sul fondo della zona comparativamente oscuro. Queste righe brillanti variano di numero, grandezza e posizione nello spettro, secondo la natura del metallo volatilizzato sia dalla fiamma sia dalla scarica elettrica. E la loro dipendenza dalla natura del metallo è tale che traendo la scintilla elettrica da una lega metallica, o mescolando alla fiamma più vapori metallici, lo spettro presenterà riuniti i sistemi di righe appartenenti ai singoli metalli.

Continuando l'esame di queste relazioni già note per le ricerche prima di Fraunhofer indi di Wheatstone, i prof. Kirchhoff e Bunsen sono recentemente pervenuti al più grande trovato dei nostri giorni, qual'è quello dell'analisi dei corpi per mezzo dello spettro. Questo nuovo mezzo analitico, che consiste nell'osservare le righe brillanti dello spettro di una fiamma contenente vapori metallici, poggia sopra i seguenti

due dati — 1° Che le righe sono indipendenti dalle combinazioni del metallo con altri corpi — 2° Che le righe si mostrano non ostante che sia estremamente piccola la quantità del metallo vaporizzato — A rifermare il primo dato, i suddetti fisici posero a cimento tutti i metalli alcalini conosciuti, come potassio, sodio, litio, bario, strontio, calcio, nello stato di cloruri, bromuri, solfati e carbonati; e videro che ciascun metallo in qualunque di queste combinazioni dava costantemente le stesse righe e nei medesimi luoghi. E rispetto al secondo dato basterà citare il seguente fatto. In una camera della capacità di 60 metri cubici essi fecero detonare 3 milligrammi di clorato di soda collo zucchero di latte; ed una piccola nube di fumo bianco si vide elevarsi nell'aria ed a mano a mano diffondersi nello spazio ambiente. Nel luogo più lontano dall'esplosione stava l'apparecchio per osservare lo spettro della fiamma d'idrogeno, che dopo pochi minuti mostrò la riga caratteristica del sodio. Or calcolando il rapporto del volume della fiamma alla capacità della stanza, appena un *trebilionesimo* di grammo di soda avrà potuto pervenire alla fiamma; ed intanto una così piccola quantità non ha lasciato di esser sensibile. Quindi si comprende come sul lido del mare ed anche ad una certa distanza dalle coste, là dove i venti continuamente tengono sospese delle molecole di sal marino, sia quasi impossibile evitare nello spettro la riga del sodio. La si vedrà ancora in un luogo qualunque, chiudendo un libro, agitando un fazzoletto, smovendo in somma in qualsiasi modo la polvere che ivi si trova.

Con questo metodo veramente stupendo il chimico in pochi minuti può conoscere se in un dato corpo siavi o pur no un nuovo metallo. Basterà ch'egli lo sciolga in un qualche liquido; che nella soluzione bagni un filo di platino, e che porti il filo bagnato nella fiamma del gas idrogeno. Se nello spettro della fiamma non vede che le righe appartenenti ai metalli già noti, sarà certo che non ve n' ha di nuovi; ma se accanto a quelle righe ne appariscono delle altre, l'esistenza di un nuovo metallo è già dichiarata; ed allora non rimane che il pazien-

te é minuto lavoro della sua separazione. Così Kirchhoff e Bunsen hanno scoperto il *rubidio* ed il *cerio*, e così ancora è stato scoperto il *tallio* da Crookes in Inghilterra.

L'apparecchio destinato a questo nuovo mezzo di analisi è detto *spettroscopio*. La fig. 316 dà un'idea di quelli attualmente costruiti dal meccanico Duboscq a Parigi. A è una lucerna a gas idrogeno: B è un'asta metallica, che porta una verghetta orizzontale che per mezzo di una vite può fissarsi all'altezza che si vuole. La verghetta sostiene un tubo di vetro terminato in una punta, in cui sta incastrato un piccolo filo di platino che insieme alla soluzione, di cui è bagnato, deve entrare nella fiamma del gas. La luce che questa diffonde, penetrando per una stretta fenditura nel cannocchiale C, incontra un prisma di flint nella scatola D, n'emerge e reca per mezzo del cannocchiale E l'immagine dello spettro all'occhio dell'osservatore. Sull'oculare poi del cannocchiale F sta un micrometro illuminato da una candela, e la cui immagine riverberata da una faccia del prisma contenuto in D, perviene all'occhio dell'osservatore insieme a quella dello spettro, e lascia così fissare con precisione il luogo occupato da ciascuna riga.

Abbiamo detto che nello spettro di una fiamma contenente vapore metallico si osservano delle righe brillanti sopra un fondo oscuro. Or se attraverso un simile spettro l'occhio dell'osservatore riceva i raggi di una sorgente luminosa più intensa di quella della fiamma, le righe prima brillanti sopra un fondo oscuro si vedranno apparir nere sopra un fondo chiaro. Aggiungasi che Kirchhoff ha trovato che per molti metalli, come *sodio*, *potassio*, *calcio*, *bario*, *ferro*, *magnesio*, *nickel*, *cobalto*, *rame* e *zinco*, le righe brillanti dei loro spettri, corrispondono esattamente a righe nere dello spettro solare, e che per altri metalli, come *litio*, *strontio*, *alluminio*, *silicio*, *cadmio*, *stagno*, *piombo*, *antimonio*, *mercurio*, *argento* ed *oro*, la coincidenza manca.

Da questi fatti Kirchhoff ha conchiuso che le righe dello spettro solare non sono che quelle dei vapori metallici esistenti nella atmosfera del sole, le quali appariscono nere sopra un

fondo chiaro anzichè brillanti sopra un fondo oscuro, perchè la luce emanata dal nucleo dell'astro è più viva di quella dell'atmosfera che lo circonda. Quindi è che nell' atmosfera del sole debbono trovarsi tutti i metalli le cui righe coincidono con quelle dello spettro solare. E questa ipotesi del fisico alemanno è la sola che si accordi coi fatti esposti in questo paragrafo, imperocchè se il sole non fosse altro che un globo incandescente privo di atmosfera lucida, il suo spettro non potrebbe esser che continuo; e se, come vogliono i moderni astronomi, all'atmosfera lucida non sottostasse che un globo oscuro, allora le righe dovrebbero mancare, o per lo meno esser brillanti, come quelle che sarebbero determinate dai vapori metallici esistenti in quell'atmosfera.

Le stelle danno ancora spettri con righe nere; le stelle dunque sono dei globi splendenti circondati da atmosfere meno lucide. E comparando le loro righe a quelle dei metalli potremmo similmente definire quali di questi corpi siano contenuti nell' atmosfera di ciascuna stella e quali ne mancano. Così il fisico può vedere nello spettroscopio di che sia composto ogni corpo celeste.

Lenti. Loro fuochi conjugati.

334. Un corpo rifrangente, terminato da due superficie sferiche, o da una superficie sferica e da un piano, dicesi *lente*; la quale poi prende gli aggiunti di *biconvessa, biconcava, pianoconcava, convessoconcava* , secondo la diversa natura e posizione delle superficie da cui è terminata.

Poichè il deviamento prodotto nei raggi luminosi dall'azione di un mezzo rifrangente, dipende dalla rispettiva posizione delle normali ai punti d'incidenza ed emergenza, egli è facile comprendere che i raggi i quali incontrano la superficie sferica di un corpo diafano , debbano essere variamente deviati a norma delle varie direzioni delle normali a quella superficie. E facendoci a considerare la parte dovuta alla curvatura della superficie d' incidenza, poniamo che AB (Fig. 321) sia l'arco generatore della calotta sferica, da cui supponiamo terminato il mezzo M più rifrangente di N. Sia p un punto luminoso, e pm uno dei suoi raggi chè rifratto secondo mp' incon-

tri in p' il prolungamento della retta po che unisce il punto luminoso p col centro o di curvatura dell'arco AB. Condotta la normale om, avremo l' angolo d'incidenza $x=z+v$ e l' angolo di rifrazione $y=z-v'$; quindi per la legge di Cartesio sarà:

$$\text{sen}(z+v)=n\,\text{sen}(z-v'),$$

ossia:

$$\text{sen}\,z\cos v+\text{sen}\,v\cos z=n(\text{sen}\,z\cos v'-\text{sen}\,v'\cos z).$$

Abbassata la perpendicolare mn alla retta pp', facciamo $mn=a$, $om=r$, $pn=p$, $p'n=q$. Supponendo che il raggio luminoso pm faccia un angolo piccolissimo colla retta op, sarà prossimamente $pm=p$, $p'm=q$, $\cos v=\cos v'=\cos z=1$. In conseguenza, essendo $\text{sen}\,v=\frac{a}{p}$, $\text{sen}\,v'=\frac{a}{q}$, $\text{sen}\,z=\frac{a}{r}$, l'ultima equazione diverrà:

$$\frac{1}{r}+\frac{1}{p}=n\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{q}\right);$$

donde:

$$q=\frac{pnr}{p(n-1)-r}.$$

Dalla quale espressione si rileva che q sarà positiva, infinita o negativa, secondo che $p(n-1)$ sarà maggiore, eguale o minore di r; vale a dire che secondo queste relazioni di grandezza di $p(n-1)$ ed r, il raggio rifratto incontrerà la po, potrà esserle parallela o divergere da essa.

Poniamo ora che il mezzo M in vece di essere indefinito nella direzione pp', sia terminato, com'è di una lente biconvessa, dalla seconda colotta AcB (Fig. 322), il cui centro di curvatura si suppone in c'. Allora il raggio pm, dopo essersi rifratto secondo mn, non continuerà il suo cammino per np', ma emergendo pel punto n si allontanerà vieppiù dalla normale $c'n$, e verrà ad incontrare l'asse cc' della lente in un punto p''. Conservando le stesse condizioni ed indicazioni di prima facciamo $=r'$ il raggio di curvatura della faccia di emergenza, e poniamo $op''=p'$. Egli è chiaro che se il raggio inci-

dente fosse stato $p''n$ e la lente avesse avuto una spessezza indefinita nella direzione $p'p$, il raggio rifratto nm avrebbe virtualmente incontrata la cc' nel punto p' e sarebbesi ottenuta:

$$q = -\frac{npr'}{p'(n-1)-r'}.$$

Comparando questo valore di q a quello di sopra trovato e liberando da fratti l'equazione che ne risulta, si ha:

$$p'rr'+prr' = pp'r'(n-1)+pp'r(n-1);$$

la quale equazione divisa pel prodotto $pp'rr'$ diviene:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{n-1}{r}+\frac{n-1}{r'}.$$

E questa relazione, trovata nel caso di una lente biconvessa tra le distanze focali conjugate p e p', è ancora applicabile:

— 1°. Ad una lente pianoconvessa, ponendo $=\infty$ il raggio di curvatura della faccia piana. Immaginando che sia piana la faccia a cui corrispondeva il raggio r', l'equazione per una lente pianoconvessa sarà:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{n-1}{r}.$$

— 2°. Ad una lenta biconcava, ponendo negativi i raggi di curvatura delle due facce. Così per una lente di questa specie si avrà:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=-\frac{n-1}{r}-\frac{n-1}{r'};$$

e se divenisse piana la faccia che aveva il raggio di curvatura r', sarebbe il termine $\frac{n-1}{r'}=0$.

— 3°, Ad una lente convessoconcava, mutando il segno al raggio di curvatura della faccia concava.

Fuoco principale. 335. Se nell'equazione tra le distanze focali conjugate di una lente poniamo $p=\infty$, vale a dire che ammettiamo l' irradiazione incidente esser parallela dell'asse della lente, avremo:

$$\frac{1}{p'}=\pm\left(\frac{n-1}{r}+\frac{n-1}{r'}\right),$$

il doppio segno rapportandosi alla duplice ipotesi di una lente convessa o concava. Il luogo dell'asse in cui i raggi rifratti dalla lente andranno a convergere realmente nella prima ipotesi e virtualmente nell'altra, dicesi *fuoco principale*, e *distanza focale principale* si denomina quella che lo separa dalla lente. Indicando con a questa distanza, ossia il valore che prende p' nell'ipotesi di $p=\infty$, l'equazione tra le distanze focali conjugate di una lente prenderà la forma:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{a},$$

divenendo così identica all'omonima equazione degli specchi sferici.

La costante a potrà esser praticamente definita nel modo che segue. Trattandosi di una lente convessa, l'esporremo all'irradiazione diretta del sole e riceveremo sopra una carta i raggi rifratti dalla lente: quando il cerchietto luminoso ivi disegnato vedremo esser divenuto minimo, saremo certi che la carta abbia incontrato il fuoco principale. Se poi la lente sia concava, ne copriremo una faccia con uno strato di materia opaca, lasciandovi liberi due punti simmetricamente situati rispetto all'asse della lente: esponendo all'irradiazione solare la faccia opposta, emergeranno pei punti lasciati liberi i due pennelli luminosi sp, tq (Fig. 323), che si faranno incontrare dal piano pq il quale si troverà alla richiesta distanza dalla lente, quando sarà l'intervallo $pq=2st$.

336. Pei centri di curvatura C e C' (Fig. 324 e 325) di una lente conduciamo l'asse CC' e le due normali parallele $Cs, C'n$: immaginando che un raggio di luce attraversi la lente nella direzione ns, facciamoci a determinare il deviamento prodotto nel raggio emergente sh'. Centro ottico.

Essendo tra loro parallele le due normali $Cs, C'n$, sarà l'angolo di rifrazione $C'ns$ eguale all'angolo d'incidenza Csn sulla seconda faccia della lente; quindi sarà l'angolo di emergenza eguale a quello d'incidenza sulla prima faccia della lente, e perciò la direzione sh' del raggio emergente sarà parallela a quel-

la del raggio incidente, vale a dire che il deviamento sarà nullo. Or i due triangoli simili $Cos, C'on$ ci danno la proporzione:

$$Cs : Co = C'n : C'o\,;$$

donde: $\quad Cs - Co : C'n - C'o = Cs : C'n\,,$

ossia facendo $\quad Cs = r$ e $C'n = r'\,,$

$$zo : ol = r : r'.$$

Dalla quale proporzione si rileva che il luogo del punto o è indipendente dall'angolo che le due normali parallele Cs e $C'n$ faranno coll' asse CC' della lente; e che in conseguenza ogni raggio luminoso che attraversandola passerà pel punto o, avrà la proprietà di emergere parallelo al raggio incidente. Il punto o si denomina *centro ottico* della lente.

Se i raggi di curvatura delle due facce della lente fossero eguali, è chiaro che il centro ottico si confonderebbe col centro di figura. E se fosse piana la faccia a cui corrisponde il raggio di curvatura r, sarebbe $r=\infty$, quindi $ol=0$; vale a dire che il centro ottico di una lente pianoconvessa, o pianoconcava, giace nel punto d' incontro dell' asse colla faccia curva della lente.

Dalla proprietà caratteristica del centro ottico risulta che ogni retta per esso condotta è una linea di simmetria rispetto al cammino dei raggi incidenti e rifratti; quindi è che ogni retta menata pel centro ottico di una lente si riguarda come un *asse secondario*.

Or facciamoci a dimostrare che tra le distanze focali conjugate di una lente, prese sopra un asse secondario qualunque, regge la stessa equazione che tra le omonime distanze sull'asse principale. Sia p (Fig. 326) il punto raggiante preso fuori l'asse nn' di una lente, pp' l'asse secondario menato pel centro ottico o e pm un raggio luminoso che rifratto dalla lente vada ad incontrare l'asse secondario nel punto p'. Prolungata la mp fino ad incontrare l'asse principale in un punto n, avremo

nei segmenti del triangolo nmn' determinati dalla segante pp' la relazione:

$$np \cdot mp' \cdot on' = pm \cdot n'p' \cdot on. \text{ [1]}$$

Facendo $po=p$, $p'm=p'$, $no=n$, $n'o=n'$, e considerando che si ha prossimamente $pm=po$, $p'm=p'o$, $nm=no$ ed $mn'=on'$, l'equazione precedente si trasformerà in:

$$(n-p)p'n' = pn(p'-n'),$$

ossia:

$$np'n' + npn' = pn'p' + pp'n;$$

la quale divisa pel prodotto $pp'nn'$ ci dà:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{n} + \frac{1}{n'}.$$

Ma n ed n', come distanze focali conjugate prese sull' asse principale, debbono soddisfare all'equazione:

$$\frac{1}{n} + \frac{1}{n'} = \frac{1}{a};$$

sarà ancora:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

337. La relazione esistente tra le distanze focali conjugate, prese su qualsiasi asse di una lente, ci conduce a poter dichiarare le immagini che ne vengono prodotte. Poniamo che in- Immagini prodotte dalle lenti.

[1] Questa equazione è l'espressione del seguente teorema, conosciuto sotto il nome di *teorema di Carnot*, quantunque noto ai geometri greci — *Dei sei segmenti, determinati da una retta che taglia i tre lati di un triangolo, il prodotto di tre di essi, non aventi estremità comune, pareggerà il prodotto degli altri tre* — Sia ABC (Fig. 327) il triangolo, ed mh la segante o *trasversale* che vi determina i sei segmenti Am, Bm, Bn, Cn, Ao, Co. Dai vertici del triangolo si conducano alla mh le perpendicolari Ae, Bc, Ch; si avranno dai triangoli simili che ne risultano le proporzioni:

$$Bm : Am = Bc : Ae$$
$$Cn : Bn = Ch : Bc$$
$$Ao : Co = Ae : Ch,$$

che moltiplicate in corrispondenza danno:

$$Bm \cdot Cn \cdot Ao : Am \cdot Bn \cdot Co = 1,$$

donde:

$$Bm \cdot Cn \cdot Ao = Am \cdot Bn \cdot Co.$$

nanzi ad una lente convessa e ad una distanza maggiore di quella del fuoco principale sia situato l'oggetto *ac* (Fig. 328). Condotti i due assi secondarii *aa'*,*cc'*, è chiaro che i raggi partiti da *a* avranno un fuoco reale sopra un punto della *aa'*, come quelli partiti da *c* lo avranno su *cc'*: dal lato opposto della lente si avrà dunque un'immagine reale e capovolta. Che se poi l'oggetto giacesse tra il fuoco principale e la lente (Fig. 329), allora i raggi ne emergerebbero divergenti, e l'occhio dell'osservatore ricevendoli come se venissero da *a'* e *b'*, vedrebbe dell'oggetto *ab* un'immagine virtuale, diritta e sempre ingrandita.

Seguendo una simile costruzione si troverà che dalle lenti concave si avranno sempre delle immagini virtuali, diritte ed impiccolite.

Lenti a scaglioni.

338. Delle proprietà delle lenti si son fatte parecchie utili applicazioni. Già fin dalla loro invenzione [1] la forza convergente delle lenti convesse è adoperata per correggere la presbiopia, come la forza divergente delle lenti concacave è utile ai miopi; e nel capo seguente vedremo come mercè le loro combinazioni la forza della vista ne sia stata prodigiosamente ingrandita. Ma il nostro secolo ha veduto per opera del celebre Fresnel sorgere un nuovo genere di applicazione delle lenti nei fari a rifrazione, nuovo benefizio recato dalla fisica alla scienza della navigazione dopo quelli della bussola, del barometro e del sestante.

Per diminuire nelle grandi lenti biconvesse la doppiezza del vetro per la quale si assorbe molta luce, Buffon aveva pensato costruirle a scaglioni circolari, di cui la fig. 330 rappresenta una sezione normale al piano della lente. Ma egli voleva farle lavorare di un sol pezzo, e s'incontrò tanta difficoltà di esecuzione da farne smettere il pensiero. Da gran tempo erano state già dimenticate, quando Fresnel volendole far servire a diffondere la luce dei fari, concepì la felice idea di comporle con diversi anelli circolari fatti di varii pezzi. Le curvature delle

[1] L'invenzione delle lenti si deve a Salvino degli Armati, banchiere fiorentino, che costruiva i primi occhiali verso il 1280.

facce rifrangenti degli anelli sono regolate in modo da far confondere i loro fuochi principali con quello della lente centrale; quindi avviene che situata la fiamma di una lucerna nel fuoco comune, la luce emerge dal sistema lenticolare secondo raggi paralleli all'asse, e conserva in conseguenza per lunghissimo tratto una stessa energia.

Misura degl'indici di rifrazione

339. Veruna utilità pratica potrebbe aversi dalla legge cartesiana $\operatorname{sen} x = n \operatorname{sen} y$, se non si avesse il mezzo di ottenere un' esatta espressione numerica di n. Or il valore di questo coefficiente, o *indice di rifrazione*, varia per una data sostanza secondo che la luce vi perviene per uno spazio vuoto o per un mezzo ponderabile; nel primo caso l'indice è *assoluto*, nel secondo è *relativo*. Ed è cosa agevole a comprendersi che la misura diretta di tutti gl'indici relativi di una data sostanza sarebbe presso che impossibile. Ma basta che delle diverse sostanze rifrangenti si abbiano i valori dei loro indici assoluti, per dedurne mercè una semplice divisione quelli dei diversi indici relativi, risultanti dalle varie combinazioni binarie di esse sostanze. Ed in vero, supponiamo che ab (Fig. 331) rappresenti una sezione normale alla faccia di congiunzione delle due lamine parallelepipede A e B di diversa sostanza: sia a, l'indice assoluto della sostanza A, b quello di B e z l'indice relativo nel passaggio da A in B. Indicando con x l'angolo di incidenza sulla prima faccia della lamina A, con y quello della 1ª rifrazione, con y' l'angolo col quale il raggio entra nel mezzo B e finalmente con x' quello sotto cui n'emerge, avremo le tre equazioni:

$$\operatorname{sen} x = a \operatorname{sen} y\ ,\quad \operatorname{sen} y = z \operatorname{sen} y'\ ,\quad b \operatorname{sen} y' = \operatorname{sen} x'\ ,$$

che moltiplicate membro con membro ci danno:

$$b \operatorname{sen} x = a z \operatorname{sen} x'.$$

Ma l'esperienza dimostra che dai sistemi di lamine rifrangenti a facce parallele la luce emerge indecomposta, e che in conseguenza i raggi n'escono in direzione parallela a quella della loro incidenza; sarà dunque $\operatorname{sen} x = \operatorname{sen} x'$: quindi:

$$b = az \quad \text{e} \quad z = \frac{b}{a}.$$

Basta dunque conoscere gl'indici assoluti delle diverse sostanze rifrangenti, perchè siano anche noti gl'indici relativi di tutti i loro accoppiamenti binarii.

L'indice assoluto di un solido trasparente si determina facendone un prisma triangolare retto, che dopo averne determinato l'angolo rifrangente per mezzo di un goniometro, si adagerà con una delle sue basi sopra un sostegno orizzontale che lo renda girevole intorno al suo asse. Allora da un punto *o* (Fig. 332) si guarderà per mezzo di un cannocchiale, mobile intorno al centro di un cerchio graduato orizzontale, ad una mira assai lontana, che supponiamo nella direzione *ov*; e poi nella direzione *ok* se ne cercherà l'immagine rifratta dal prisma, già voltato fino a presentarla sotto il minimo deviamento. Si avrà così l'angolo d'incidenza *i* eguale all'angolo di emergenza i', e l'angolo di rifrazione *r* eguale all'altro r' sotto cui incontra la seconda faccia del prisma. Sarà in conseguenza l'angolo rifrangente:

$$A=2r\text{, donde } r=\frac{A}{2}.$$

Inoltre per la grande distanza della mira potendosi riguardare come paralleli i raggi *tm* e *vo*, si avrà l'angolo di deviamento D (già misurato per mezzo del cerchio graduato) espresso da:

$$kov=kst=smn+snm=i-r+i'-r'=2i-2r=2i-A.$$

Quindi $i=\frac{A+D}{2}$; ed in fine l'indice richiesto:

$$n=\text{sen}\,\frac{A+D}{2}:\text{sen}\,\frac{A}{2}.$$

Consimile metodo si è seguito ancora pei liquidi. Ai quali si è data forma prismatica riempendone per mezzo di un foro (Fig. 333) scolpito in una delle facce di un prisma di cristallo, un canaletto scavato attraverso l'angolo rifrangente opposto, e chiuso negli estremi da due lastre piane. E l'esperimento fu menato a termine egualmente che pei solidi, dopo aver determi-

nato il piccolo deviamento che poteva venir prodotto dal non essere perfettamente parallele le opposte facce delle lastre.

Il metodo del prisma è stato ancora applicato alla ricerca degl'indici di rifrazione dei corpi aeriformi. Biot ed Arago presero all' uopo un lungo tubo di cristallo, e con lamine piane di analoga sostanza ne chiusero le due basi che facevano tra loro un angolo assai ottuso. Fermarono orizzontalmente il tubo ad un asse verticale intorno al quale poteva girare a piacere dell'osservatore, e lo posero in comunicazione con due altri tubi, l'uno dei quali conteneva un barometro per conoscere la densità del gas messo a pruova, l'altro si apriva a vicenda in una campana pneumatica per fare il vacuo nell'apparecchio, e nella campana che conteneva il gas da sperimentarsi. Fatto il voto nel prisma, determinarono l' indice assoluto dell'aria; e riempitolo poi successivamente di diversi gas, misurarono i loro indici rispetto all'aria, e vennero così a conoscere i loro indici assoluti.

340. Sappiamo (n° 332) la luce comporsi di raggi, che hanno una rifrangibilità crescente dal rosso al violetto; e che in conseguenza un pennello di luce bianca a raggi paralleli incontrando una delle facce dell'angolo rifrangente di un prisma, va per linee divergenti nell'emergere dall'altra faccia. Questa mutua divergenza che per opera della rifrazione ha luogo in un fascetto di raggi paralleli, appellasi *dispersione*; ed essa è misurata dalla differenza dei deviamenti patiti dai raggi estremi dello spettro luminoso. **Potere dispersivo.**

Per agevolarne la misura, si userà di un prisma il cui angolo rifrangente A (Fig. 315) sia di pochi gradi, e che piccolo ancora sia l'angolo d'incidenza x sotto cui venga incontrato da un pennello di luce bianca. In conseguenza saranno anche piccoli l'angolo di rifrazione y, quello della seconda incidenza y' e l'altro di emergenza x'. Potremo dunque nella legge cartesiana sostituire gli angoli ai loro seni, ed avremo:

$$x = ny \;,\quad x' = ny' \;,$$

e quindi:
$$x + x' = n(y + y') = nA.$$

Or il deviamento D che la rifrazione induce in un raggio qualunque del pennello luminoso essendo dato dall'equazione:

$$D = x + x' - (y + y'),$$

avremo mercè la sostituzione dei valori precedenti:

$$D = A(n-1);$$

e sostituendo in questa formola all'indice generico n i valori n_v ed n_r che prende rispetto ai raggi violetti e rossi estremi, ed indicando con D_v e D_r i corrispondenti deviamenti, avremo la dispersione, effettuita dal prisma, espressa dall' equazione:

$$D_v - D_r = A(n_v - n_r).$$

Il fattore $n_v - n_r$ dicesi *coefficiente di dispersione*; e perchè il valore $D_v - D_r$ che la rapresenta, riuscisse indipendente dall'angolo rifrangente del prisma, si dividerà l'equazione precedente, membro a membro, per l'altra;

$$D_g = A(n_g - 1)$$

che esprime il deviamento patito dai raggi gialli prossimi ai verdi: e così si avrà:

$$\frac{D_v - D_r}{D_g} = \frac{n_v - n_r}{n_g - 1}.$$

La frazione che rappresenta il 2° membro di questa equazione, costituisce il *potere dispersivo* di una data sostanza.

Acromatismo. 341. Poste le condizioni indicate nel n° precedente, fingiamo che all' angolo rifrangente A (Fig. 334) di un prisma di data sostanza pongasi in contatto l'angolo B di un prisma di sostanza diversa; e siano in generale n ed n' gl'indici di rifrazione delle due sostanze. Cospirando i due prismi a deviare la luce per un medesimo verso il deviamento prodotto dal loro sistema sarà somma dei deviamenti che avrebbero individualmente prodotti; ed in conseguenza si avrà:

$$D = A(n-1) + B(n'-1);$$

donde pei raggi violetti risulta:

$$D_v = A(n_v - 1) + B(n'_v - 1)$$

e pei rossi si ha:

$$D_r = A(n_r - 1) + B(n'_r - 1).$$

Quindi perchè i raggi violetti emergano paralleli ai rossi, dovrà esser soddisfatta l'equazione:

$$A(n_v - 1) + B(n'_v - 1) = A(n_r - 1) + B(n'_r - 1).$$

Dalla quale risulta:

$$B = -\frac{n_v - n_r}{n_v' - n'_r}.$$

Or mutando il segno di B nelle due equazioni che danno i valori di D_v e D_r, si vede che per ottenere i raggi rossi paralleli ai violetti, il deviamento prodotto dal sistema dei due prismi dovrà essere la differenza anzichè la somma dei loro deviamenti parziali, e che in conseguenza i due prismi dovranno esser uniti come si vede nella fig. 335.

Potremmo del pari unire sette prismi di diverse sostanze di cui fossero noti gl'indici di rifrazione, e dato ad arbitrio ma sempre nei limiti di una grande piccolezza l'angolo rifrangente di uno dei prismi, potremmo mercè sei equazioni determinare gli angoli dei rimanenti in modo da rendere paralleli i diversi raggi della luce emergente. Così facendo non si avrà colorazione per dispersione di raggi, e perciò un consimile sistema va distinto coll'aggiunto di *acromatico*, che vuol dire *senza colore*.

Che i prismi abbiano ad esser sette per produrre un perfetto acromatismo, ciò viene indicato dall'egual numero di zone colorate nella luce dello spettro; ma nel fatto bastano due soli prismi a rendere presso che insensibile lo spettro ch'emerge dal loro sistema.

L'esempio dei prismi non ha servito che a darci un'idea dell'acromatismo, ma è soprattutto nelle lenti che lo si trova importante; essendo che nell'assegnare la mutua dipendenza delle distanze focali conjugate di una lente (n° 334), abbiamo fatto astrazione dai diversi valori che l'indice di rifrazione n della sostanza della lente deve prendere secondo i varii elementi

della luce incidente. Pei quali diversi valori di n poi avviene che ad un medesimo punto raggiante corrispondano tanti fuochi conjugati quanti sono gli elementi della luce incidente, e che in conseguenza i contorni delle immagini prodotte dalle lenti ci appariscano iridati.

A toglier di mezzo questo ***errore di rifrangibilità*** delle lenti servono i loro accoppiamenti acromatici, la cui possibilità ci sarà chiara dopo che avremo determinato come dalle distanze focali principali di due lenti dipenda quella del sistema da esse composto.

Perciò fare poniamo che le due lenti (Fig. 337) confondano i loro assi; che in p sia il punto raggiante, che abbia il suo fuoco conjugato in p' rispetto alla prima, ma che per azione della seconda lente vada trasportato sull' asse comune in p''. Chiamando a la distanza focale principale della 1ª lente, p e p' le distanze conjugate dei punti omonimi, avremo (n° 335):

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{a}.$$

Ma il raggio che attraversando le due lenti incontra l'asse in in p'' anzichè in p', avrebbe in quest' ultimo punto un fuoco virtuale se in vece di partire da p, movesse da p''. Perciò, chiamando a' la distanza focale principale della 2ª lente, sarà:

$$-\frac{1}{p'}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a'}.$$

Or addizionando le due equazioni si ha:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}.$$

Ma se indichiamo con a'' la distanza focale principale del sistema delle due lenti, si avrà:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a''};$$

dunque:

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{a''}.$$

Posta questa relazione tra le distanze focali principali delle due lenti e del loro sistema, ed indicando con r ed r' i raggi di curvatura delle facce della 1ª lente con r_1 ed r'_1 quelli della 2ª, e con n ed n' gl'indici di rifrazione delle rispettive sostanze, sarà (nº 334).

$$\frac{1}{a''}=(n-1)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right)+(n'-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r'_1}\right).$$

E affinchè dal sistema delle due lenti i raggi violetti emergano paralleli ai rossi, è necessario che il valore di $\frac{1}{a''}$ resti invariato, quando nell'ultima equazione in vece di n ed n' si pongano una volta gl'indici dei raggi violetti n_v ed n'_v; ed un'altra quelli dei rossi n_r ed n'_r. Facendo questa sostituzione, e sottraendo l'una dall'altra le due equazioni che ne risultano dovrà essere, nell'ipotesi che $\frac{1}{a''}$ rimanga invariato:

$$(n_v-n_r)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right)+(n'_v-n'_r)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r'_1}\right)=0.$$

Ma se ammettiamo che n ed n' rappresentino i valori medii degl' indici di rifrazione delle due sostanze, delle quali chiamiamo d e d' i poteri dispersivi, avremo:

$$d(n-1)=n_v-n_r \quad \text{e} \quad d'(n'-1)=n'_v-n'_r\ ;$$

e questi valori, sostituiti nell' equazione precedente ci daranno:

$$d(n-1)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right)+d'(n'-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r'_1}\right)=0, \text{ ossia } \frac{d}{a}+\frac{d'}{a'}=0.$$

Vale a dire che per ottenere un sistema acromatico dall'unione delle due lenti, fa d'uopo che le loro distanze focali principali sieno direttamente proporzionali ai poteri dispersivi delle loro sostanze, ed abbiano segni diversi, ossia che una delle lenti debba esser convergente e l'altra divergente.

Or per vedere quale debba esser la convergente e quale la

divergente, poniamo successivamente nell'ultima equazione i i valori di $\frac{1}{a}$ ed $\frac{1}{a'}$ tratti dalla relazione $\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{a''}$. Così facendo troveremo:

$$\frac{1}{a'}=\frac{d}{d-d'}\cdot\frac{1}{a''} \quad \text{ed} \quad \frac{1}{a}=-\frac{d'}{d-d'}\cdot\frac{1}{a''}.$$

Vale a dire che dovrà esser divergente la lente la cui sostanza ha maggior potere dispersivo.

CAPO QUARTO.

STRUMENTI OTTICI.

Stereoscopio. 342. Il semplice considerare che i raggi luminosi provvenienti dai diversi punti di un oggetto non possono penetrare nell'occhio senza che s'incrociassero nella pupilla, è più che sufficiente a dimostrare che l'immagine da essi dipinta sulla retina debba essere necessariamente capovolta. E questa illazione è stata rifermata da sperimenti istituiti sugli occhi tolti da cadaveri sì umani che di altri animali. Intanto gli oggetti non ci appariscono capovolti; e ciò deriva dal perchè il tatto ci ha assuefatti a giudicare la posizione di ogni punto obbiettivo come esistente sul *raggio visuale*, ossia sulla retta che congiunge il centro della pupilla col luogo occupato dall'immagine di quel punto sulla retina. Quindi è che ci deve apparire come situato in alto ciò che sulla retina sta dipinto in basso, e viceversa.

Mercè del tatto ancora abbiamo apparato a giudicar unico l'oggetto su cui convengono i due raggi visuali, non ostante le due immagini dipinte negli occhi. E che la cosa vada così, n'è pruova il seguente semplicissimo esperimento. Ponendo innanzi agli occhi, che immaginiamo in L ed M (Fig. 341) un oggetto C, e guardandone uno più lontano N, vedremo

del primo le due immagini C′ e C″; e chiudendo ora un occhio ed ora l'altro, ci faremo certi che l' immagine C′ sia veduta dall'occhio destro e C″ dal sinistro.

Per opera del tatto infine abbiamo appreso a conoscere le tre dimensioni negli oggetti veduti, quantunque le immagini dipinte sulla retina non ne presentassero che due. Al che siamo pervenuti coll'aver associato alle indicazioni del tatto e le diverse linee di chiaro ed oscuro che presenta la superficie visibile di un corpo, e la mancanza di riverberazione lucida nell'aria ambiente il suo contorno apparente, ed in fine il suo diverso aspetto in conseguenza della *paralasse binoculare*, ossia della diversa apparenza di un obbietto secondo che lo si guarda coll' occhio destro o col sinistro. Così menando dai punti L ed M (Fig. 342), in cui supponiamo gli occhi di un osservatore che guarda la palla K, le rispettive coppie di tangenti al cerchio che la rappresenta, avremo che l'occhio sinistro vedrà la calotta definita dall'arco *abc* compreso tra i punti di contatto *a* e *c*, mentre l'occhio destro vedrà la calotta *mce* determinata dall' arco *me* tra i punti di contatto *m* ed *e*. Sarà dunque l'arco *am* invisibile all'occhio destro, egualmente che l'arco *ce* lo è rispetto all'occhio sinistro. Questo effetto però non è sensibile che tra ristrettissimi limiti di distanza, imperocchè è desso proporzionale all'angolo formato dai due raggi visuali diretti ad un medesimo punto dell'oggetto che si guarda, e quest'angolo già diviene piccolissimo per una distanza di soli 24 piedi. Potremo dunque esser certi che per oggetti situati a distanze maggiori gli occhi non possono trarre dalla loro paralasse verun argomento di una terza dimensione.

Or la paralasse binoculare, che rende così spiccata la terza dimensione nella visione degli oggetti che ci stanno assai da vicino, è quella appunto che produce i meravigliosi effetti dello *stereoscopio*. Questo apparecchio, inventato da Wheatstone, sul principio non fu che un istrumento catottrico, ossia un istrumento fondato sulle leggi della riverberazione speculare della luce. Per avere un'idea di questa sua forma primi-

tiva, s'immagini una cassa parallelepipeda ABCD (Fig, 318) aperta in AB ed avente nella faccia CD due fori, L ed M, da potervisi applicare gli occhi dell'osservatore. Dentro la cassa stiano fermati ad angolo retto due specchi piani P e Q, e sulle pareti interne AC e BD poniamo che si trovino disegnate le due immagini di uno stesso oggetto, quali si avrebbero guardandolo ora coll'occhio sinistro ed ora col destro soltanto. Siano *s* ed *s'* le due immagini di uno stesso punto della superficie dell'oggetto, veduto nell'indicato modo: i raggi *st* ed *s't'* che ne partono, riverberati dagli specchi P e Q secondo *t*L e *t'*M, arriveranno agli occhi dell'osservatore come se venissero dal loro incontro virtuale O, ed ivi faranno vedere il corrispondente punto dell'oggetto. Dicasi altrettanto degli altri punti delle due immagini, e si comprenderà chiaramente come esse dovranno unificarsi nella visione di un oggetto che l'osservatore crederà vedere in O.

All'uffizio della riflessione speculare Brewster sostituì quello della rifrazione, e così lo stereoscopio ebbe la forma definitiva sotto la quale è ora conosciuto. S'immagini all'uopo che una lente biconvessa sia tagliata in due mercè un piano che pel centro ottico vada normalmente alla superficie della lente; e che queste due metà rappresentate da A e B (Fig.317) siano incastrate in due fori scolpiti in una delle pareti di una cassa, dentro la quale normalmente agli assi principali delle due metà della lente ed alla distanza dei loro fuochi principali siano situate le due immagini di uno stesso oggetto, quali si avrebbero guardandolo a piccola distanza or coll'occhio destro, ed or col sinistro. Ponendo che *p* e *q* sieno le due immagini di un medesimo punto dell'oggetto, i raggi *ps* e *qt* che ne partono, emergeranno dalle due semilenti A e B secondo le direzioni *sl* e *tm* rispettivamente parallele (n° 336) ai raggi *ph* e *qg* che dagli stessi punti *p* e *q* vanno pei centri ottici di A e B. Gli occhi dell'osservatore li riceveranno dunque come se venissero dal loro incontro virtuale O, ed ivi sarà perciò veduto un punto unico; e considerando che un simile effetto va prodotto dalle immagini monoculari dei rimanenti punti

visibili dell'oggetto, si comprenderà di leggieri come dalla loro simultanea visione debba risultare quella dell'oggetto stesso sotto le sue tre dimensioni. Nel fatto le due semilenti, in vece di esser incastrate in due fori, stanno chiuse nei tubi F ed H (Fig. 320) che sono mobili secondo i loro assi, affinchè la distanza delle lenti dai due disegni monoculari che stanno sul fondo BAC, fosse aggiustata alla vista dell'osservatore. E perchè i disegni sieno bene illuminati, la porzione DE del fondo superiore è resa mobile a cerniera ed è vestita di una specchiante lamina metallica sulla faccia interna.

Or la paralasse binoculare, che produce tutta la magia dello stereoscopio, non ha luogo che nella visione degli oggetti che ci sono assai da vicino; quindi è che per questi oggetti soltanto lo stereoscopio imita ciò che realmente avviene nella sensazione visiva. Ma quando lo facciamo servire a rappresentarci delle montagne, dei lunghi viali, ecc., degli oggetti in somma che non possiamo comprendere nel nostro sguardo se non li vediamo da lontano, allora l'effetto osservato quantunque avesse una sorprendente naturalezza, purtuttavia non è che una esagerazione di ciò che nel fatto della visione realmente avviene.

Abbiamo finora supposta la possibilità dei due disegni monoculari che debbono produrre l'illusione di una veduta reale. Che simili disegni possan esser l'opera di un artista, è cosa impossibile; ma avventurosamente la fotografia, che sola sa riprodurli, era già un fatto assicurato quando Wheatstone concepiva il suo meraviglioso apparecchio.

343. La costruzione della *camera oscura* poggia sulla proprietà che hanno le lenti convergenti di produrre in uno dei loro fuochi conjugati un'immagine capovolta dell'oggetto esistente nell'altro fuoco. Or se tra la lente *mn* (Fig. 344) e l'immagine $a'b'$ dell'oggetto ab, pongasi uno specchio piano inclinato di 45° sull'asse della lente, l'immagine verrà riverberata in $a''b''$ sopra un piano a quell'asse parallelo: ed un osservatore che si facesse a guardarla ponendosi d'incontro all'oggetto la vedrebbe diritta. E se la lente stesse incastrata in una Camera oscura.

delle pareti verticali di una cassa, il cui fondo superiore essendo all' altezza dell'immagine $a'b'$, quivi offrisse un vetro spulito, se ne potrebbe trarre un disegno seguendo con un lapis il contorno dell'immagine.

La fig. 345 rappresenta l'ordinaria forma di una camera oscura destinata al disegno di passaggio. Lo specchio ivi è situato in modo da riverberare sulla lente i raggi provvenienti dall'oggetto, e che dopo la loro rifrazione ne vanno a dipingere l' immagine sopra un piano situato nell' interno della camera.

Lanterna magica.

344. Questo apparecchio, inventato da Kircher, riproduce in ordine inverso i fenomeni della camera oscura; imperocchè l'oggetto sta in uno spazio chiuso ed illuminato, la *lanterna*, e l'immagine n'è prodotta al difuori. L'oggetto consiste in una qualche figura dipinta su di una lamina di vetro, e che si pone capovolta dentro la lanterna, nella quale è rischiarata dalla luce di una lucerna, che riverberata da uno specchio concavo è poi concentrata da una lente convergente. Questi raggi dopo avèr attraversato la lamina di vetro incontrano una seconda lente, che posta ad una distanza maggiore di quella del suo fuoco principale, produce sopra una tela situata fuori della lanterna un'immagine ingrandita e diritta dell'oggetto che capovolto sta dipinto sul vetro.

Egli è facile comprendere che la grandezza dell' immagine così prodotta, la precisione del suo disegno ed il grado di luce da cui apparirà illuminata, dipendono dalla distanza della lanterna dalla tela, e dall'intervallo che corre tra la lamina di vetro e ciascuna delle due lenti in mezzo a cui giace. Quindi è che facendo variare queste distanze si potrà ottenere un'immagine sul principio piccola, confusa e poco illuminata, e che poi vada celeramente crescendo in grandezza, precisione e luce, dimodochè l' osservatore situato dall' altro lato della tela non potrà sottrarsi da quel senso di spavento che naturalmente deve concepire alla vista di un oggetto che da lontano sembra venirgli contro con una grande velocità. Questo giuochetto eseguito colla lanterna magica porta il nome di *fantasmagoria*.

345. Questa camera, inventata da Wollaston, serve a ritrarre le immagini degli oggetti egualmente che la camera oscura. Essa consiste in un prisma quadrangolare di cristallo (Fig. 347) il cui angolo D è retto, ed i rimanenti son tali che i raggi di luce che incontrano perpendicolarmente la faccia DC del prisma, sono successivamente riflessi dalle facce BC e BA ed in fine emergono normali alla DA. Perchè queste condizioni sieno soddisfatte, fa d'uopo che gli angoli Asz e Cnm sieno rispettivamente complementarii degli angoli A e C, e che in conseguenza sia l'angolo: Camera lucida.

$$B=180^\circ-(Asz+Cnm)=180^\circ-(90^\circ-A+90^\circ-C)=A+C.$$

Ma essendo $D=90^\circ$, sarà $A+B+C=270^\circ$; quindi $B=A+C=135^\circ$. Gli angoli A e C potrebbero in conseguenza esser qualunque, purchè la loro somma pareggiasse 135°; ma l'emergenza della luce dalla faccia AD e la sua riflessione sulla BC richieggono che gli angoli A e C sieno acuti, ed ordinariamente si fanno eguali. Or l'osservatore ricevendo i raggi che emergono perpendicolari dalla faccia BD, vedrà projettata sopra un piano pq ad essa parallelo l'immagine dell'oggetto situato dirimpetto alla faccia DC, e potrà su quel piano disegnarla.

346. Ogni lente biconvessa mn (Fig. 329) di corto fuoco può servire da *microscopio semplice*, imperocchè di un piccolo oggetto ab situato tra la lente ed il suo fuoco principale, i raggi perverranno all'occhio dell'osservatore che li riceve dal lato opposto, come se movessero dall'immagine virtuale $a'b'$, conjugata di ab; e perciò le dimensioni dell'oggetto appariranno ingrandite nella ragione di $a'b'$ ad ab, vale a dire nella ragione delle rispettive distanze conjugate. Laonde indicando con h la distanza di ab dalla lente, con $-h'$ quella di $a'b'$ e con a quella del fuoco principale, avremo (n° 335): Microscopio

$$\frac{1}{h}-\frac{1}{h'}=\frac{1}{a},$$

donde:

$$\frac{h'}{h}=\frac{a}{a-h}.$$

Per la quale relazione si conosce che il rapporto $\frac{h'}{h}$, che misura l'ingrandimento, deve crescere di valore a misura che la distanza h dell'oggetto dalla lente si avvicina a pareggiare la distanza a del suo fuoco principale. Questa distanza sarà dunque un limite di quella a cui potrà esser situato l'oggetto; e poichè a questo limite di distanza lo si vedrebbe sotto un angolo prossimamente misurato dal rapporto della sua reale grandezza alla distanza focale principale, così chiaramente si vede la ragione per la quale i maggiori ingrandimenti si abbiano dalle lenti di più corto fuoco, ossia (n° 334) dalle lenti che hanno maggiore curvatura. In queste lenti però riescono assai sensibili i così detti *errori di sfericità e rifrangibilità*, pei quali restano fortemente alterati la forma ed il colore dell'immagine; e poichè i raggi che vanno prossimi al centro ottico della lente risentono assai poco degl'indicati errori, perciò a poter conciliare la precisione dell'immagine con un forte ingrandimento Wollaston proponeva che la lente si componesse di due lenti pianoconvesse, separate da un sottilissimo disco metallico, avente un foro centrale del diametro di circa $\frac{1}{5}$ della distanza focale principale.

Poichè nella frazione $\frac{a}{a-h}$, che definisce la quantità dell'ingrandimento, il denominatore può indefinitamente approssimarsi a zero, pare che da una data lente si potesse ottenere quell'ingrandimento che si vuole: purtuttavia la cosa va in ben altro modo, imperocchè evvi una distanza definita nella quale sono distintamente visibili i piccoli oggetti, e perciò denominata *distanza della visione distinta*, la quale per una vista regolare monta a circa dieci pollici, ed è poi variamente più grande pei presbiti e più piccola pei miopi. A questa distanza fa d'uopo che sia l'immagine virtuale dell'oggetto, affinchè si possa distintamente vedere; quindi è che indicandola con k, sarà $\frac{k}{a}$ l'espressione dell'ingrandimento possibile con

una lente di cui a rappresenti la distanza focale principale. Donde poi si rileva che l'ingrandimento prodotto da una data lente sarà massimo pei presbiti e minimo pei miopi.

E se l'oggetto in vece di giacère tra una lente convergente ed il suo fuoco principale, si trovasse al di là di questo fuoco, avremmo nel corrispondente fuoco conjugato un'immagine reale e capovolta dello stesso oggetto; e questa immagine per la nota equazione tra le distanze focali conjugate, risulterebbe più grande a misura che l'oggetto andrebbe approssimandosi al fuoco principale della lente. Or se l'immagine $a'b'$ (Fig. 348) così prodotta, si guardi per mezzo di una seconda lente convergente A, che ne disti meno del suo fuoco principale, l'occhio la vedrà ingrandita nel rapporto della distanza della visione distinta a quella del foco principale della lente. Perciò chiamando p la distanza dell'oggetto dalla lente B, p' la sua conjugata ed a quella del fuoco principale, avremo mercè la solita equazione, che nell'immagine prodotta dalla lente B le dimensioni prospettiche dell' oggetto saranno ingrandite nel rapporto di:

$$\frac{p'}{p}=\frac{a}{p-a}.$$

Ingrandimento, che poi cresce nella ragione della distanza della visione distinta a quella del fuoco principale della lente A.

Il sistema delle due lenti convergenti A e B costituisce il *microscopio composto*; quale è stato inventato da Galilei: la lente A, cui si applica l'occhio dell'osservatore, si distingue coll'aggiunto di *oculare* e B con quello di *obbiettiva*.

In questo microscopio però l'immagine riuscirebbe iridata per l' ineguale rifrangibilità dei diversi elementi prismatici della luce inviata dall'oggetto. Ad un sì grave inconveniente d'ordinario si rimedia raggiungendo all'oculare A (Fig. 349) una lente convergente C, la quale produca in $r'r'$ e $v'v'$ le immagini rr e vv date dai raggi rossi e violetti nel fuoco conjugato dell'obbiettiva B; e le produca in modo da esser vedute insieme alle intermedie, generate dagli altri elementi pris-

matici della luce incidente, sotto un medesimo angolo $a'Ab'$: così tutte appariranno soprapposte le une alle altre, e l'oggetto si vedrà nel suo proprio colore. Questo modo di correzione non sarebbe purtuttavia soddisfacente in un microscopio di considerevole ingrandimento, e perciò i migliori strumenti di questa specie sono provveduti di lenti acromatiche.

Microscopio solare.

347. Se in vece di porre l' oggetto tra una lente assai convergente ed il suo fuoco principale, lo si ponesse alquanto più in là di questo punto, si avrebbe un'immagine reale assai ingrandita, e che si potrebbe osservare ricevendola sopra un piano. La sua chiarezza però dovendo seguire la ragione inversa dell' ingrandimento in superficie, non potrebbe essere sufficiente se l'oggetto non fosse vivamente illuminato; nè la figura potrebbe riuscire distinta, se il campo da essa occupato non fosse sottratto dall'azione di ogni altra luce. A queste condizioni soddisfa pienamente il *microscopio solare*. Immaginiamo uno specchio piano *ab* (Fig. 350) inclinato in modo da riverberare un fascio di luce solare nell'interno del tubo *tz*, nel quale tra due lamine piane di cristallo giace l'oggetto di cui si vuole un' immagine ingrandita. A tal uopo il tubo è situato dentro una camera oscura, ed è provveduto delle due lenti convergenti C e C', di cui la prima concentra i raggi solari sull'oggetto affinchè sia fortemente illuminato, e la seconda che n'è lontana poco più del suo fuoco principale, produce l'immagine ingrandita *pq*.

Cannocchiale di Galilei.

348. Nel 1609 erasi diffusa in Venezia la nuova che in Fiandra fosse stato presentato al Conte Maurizio di Nassau un istrumento costrutto in modo da far vedere come se fossero vicini gli oggetti assai lontani. In una gita, fatta a Venezia nel maggio di quell' anno, Galilei seppe una tal nuova; e tosto che fu di ritorno a Padova, gli bastò una notte a meditarvi sopra, perchè nel dimani fosse già costrutto il cannocchiale che porta il suo nome. E giova osservare che l'istrumento così divinato dalla scienza, riuscì di tanto superiore a quello trovato per azzardo dal costruttore fiammingo, che nel 1637 tuttavia non si sapeva in Olanda costruire un cannoc-

chiale buono a far vedere i satelliti di Giove, che Galilei aveva scoverti dieci mesi dopo la invenzione del suo strumento.

Il cannocchiale di Galilei si compone di due lenti, di un'obbiettiva convergente B (Fig. 351) e di un' oculare divergente C, ordinate sopra un medesimo asse. L'obbiettiva formerebbe presso al suo fuoco principale un'immagine inversa *mn* dello oggetto che si suppone assai lontano, ma l' oculare C, messa tra l'obbiettiva e la sua immagine, impedisce che questa si formi e fa emergere i raggi in modo da produrla in *m'n'* virtuale, diritta ed ingrandita.

L'oggetto essendo assai lontano, la sua grandezza apparente è definita dall'angolo sotto cui si vede, e perciò l'occhio dello osservatore se fosse nel centro ottico dell'obbiettiva vedrebbe l'immagine *mn* eguale all'oggetto, perchè si presenterebbero sotto gli angoli eguali *azb* ed *mzn*. Ma l'oculare facendo vedere l'immagine *mn* sotto l'angolo *mon*, la ingrandisce nel rapporto di $\frac{\frac{1}{2} mn}{os}$ ad $\frac{\frac{1}{2} mn}{zs}$ ossia di *zs* ad *os*, vale a dire della distanza focale principale dell'obbiettiva all'omonima distanza dell'oculare. Quindi perchè l' immagine si vegga ingrandita per mezzo dell'oculare, fa d'uopo che questa abbia distanza focale minore di quella dell'obbiettiva.

Dall'esser l'ingrandimento definito dalla ragione delle distanze focali delle due lenti sembrerebbe doversi dedurre che non vi fosse altro limite, che quello risultante dai possibili valori di quelle distanze. Purtuttavia la cosa va assai diversa; imperocchè l'azione divergente dell'oculare fa perdere all'occhio dell'osservatore molti dei pennelli luminosi che concorrebbero a formare l'immagine nel fuoco dell'obbiettiva, ed in conseguenza la grandezza apparente dell'oggetto non può crescere che a scapito della sua chiarezza. Quindi è che l'invenzione del Galilei oggi non si vede attuata che negli occhialini da teatro, specialmente dopo che Frate Cherubino da Orléans seppe farne dei binocoli. Ciò non ostante il cannocchiale di Galilei per opera dello stesso inventore faceva ricca l'astronomia di tre capitali scoverte, le macchie cioè del sole, le fasi di Venere ed i satelliti di Giove.

Cannocchiale astronomico.

349. All'oculare divergente Kepler sostituì un'oculare convergente che facesse vedere ingrandita come *m'n'* (Fig. 352) l'immagine *mn* prodotta nel fuoco dell'obbiettiva A. Egli è vero che così facendo, gli oggetti appariscono capovolti nel campo del cannocchiale, ma si ha il vantaggio di poter ottenere un maggiore ingrandimento; stante che per l'azione convergente dell'oculare i pennelli luminosi che l'attraversano, anzi che venirne dispersi come farebbe un'oculare divergente, sono riuniti in un piccolo spazio *o* in cui va situato l'occhio dell'osservatore. Quindi si comprende come questa nuova forma di cannocchiale sia capace di quella prodigiosa forza che si osserva nei grandi rifrattori costrutti a giorni nostri.

Se l'inversione dell'immagine dispiace nell'osservazione degli oggetti terrestri, non apporta fastidio in quella degli astri, per quali è destinato l'uso del cannocchiale di Kepler, e che perciò ha ricevuto l'aggiunto di *astronomico*.

In questo cannocchiale l'ingrandimento, come quello che dipende dalla ragione degli angoli visuali *mzn* ed *msn*, è dato ancora dal rapporto della distanza focale della lente obbiettiva a quella dell'oculare. E poichè la lunghezza dell'apparecchio deve pareggiare la somma delle distanze focali delle due lenti; quindi è che il cannocchiale non può avere molta forza d'ingrandimento senza divenire eccessivamente lungo, e senza avere un'obbiettiva di grande diametro per dar adito alla quantità di luce richiesta per la chiarezza dell'immagine. Per ovviare alla difficoltà di un tubo assai lungo Huyghens compose il suo *cannocchiale aereo*, consistente in due tubi separati, di cui l'uno conteneva l'oculare, l'altro l'obbiettiva. Con questo cannocchiale, oggi dimenticato perchè assai malagevole nell'uso, il suo inventore scovrì l'anello di Saturno, che Galilei per la poca forza del suo cannocchiale aveva veduto sotto forma di due corpi addossati al pianeta principale.

Cannocchiale terrestre.

350. Dopo l'invenzione del cannochiale astronomico il P. Rheita compose il *cannocchiale terrestre*, il quale mercè due lenti aggiunte all'obbiettiva raddrizza l'immagine da essa prodotta. Delle due lenti aggiunte, C e D (Fig. 353),

la prima dista dall' immagine mn, dipinta nel fuoco dell'obbiettiva, per quanto è la lunghezza del suo fuoco principale; così i raggi che l'attraversano, n'escono paralleli, ed i loro fascetti incrociandosi prima d'incontrare la lente D, vanno a dipingere nel fuoco di questa l'immagine $n'm'$ situata rispetto all'oculare E egnalmente che l'oggetto.

251. Poichè l'immagine da essere ingrandita per mezzo dell'oculare di un cannocchiale, potrebbe egualmente generarsi nel fuoco di uno specchio concavo, si comprende come degli specchi di questa specie abbiano potuto esser sostituiti alle lenti obbiettive e dare origine ai così detti *telescopii*. Telescopio.

Il primo strumento di questa fatta e della cui esistenza abbiasi indubitata certezza[1], fu il telescopio ideato e costrutto da Newton, dopo che talune ricerche da lui istituite sulla dispersione dei raggi rifratti l'ebbero indotto nell'errore di credere impossibile l'acromatismo delle lenti. Il telescopio nowtoniano componevasi di un tubo (Fig. 355) che nel fondo aveva uno specchio concavo nt che confondeva il suo asse con quello del tubo. Fra questo specchio ed il suo fuoco principale stava lo specchietto piano s di figura ellittica, il quale inclinato di 45° sull'asse del tubo faceva sì che l'immagine che sarebbesi formata nel fuoco m dello specchio concavo, andasse in vece a disegnarsi in z dentro un tubo innestato al primo ad angolo retto e provveduto dell'apparecchio oculare.

Il motivo di questo ordinamento fu quello d'impedire che l'osservatore, fattosi innanzi al telescopio per vedere l'immagine prodotta nel fuoco del riflettore, potesse col suo corpo intercettare la maggior parte della luce inviata dall'oggetto. Ma ciò che in questo telescopio sarebbe avvenuto atteso il

[1] Una tradizione musulmana, diffusa tra gli orientali, assicurava che sul faro di Alessandria eravi un grande riflettore, per mezzo del quale si potevano vedere le navi che uscivano dai porti della Grecia. E l'illustre Libri ha scoverto nella corrispondenza dell'astronomo francese Bouillau un documento originale, dal quale si rileva che quando Newton costruiva il suo telescopio, un istrumento analogo si conservava a Ragusa, e pel suo mezzo si potevano vedere le navi che in distanza di 25 a 30 miglia transitavano per l'Adriatico — *Histoire des scien. math. tom.* 1, p. 214.

modico diametro del suo tubo, si è potuto evitare in quello che con 4 piedi di apertura e 40 piedi di distanza focale fu costrutto dal celebre Herschell. Il quale ponendo l'asse dello specchio alquanto inclinato a quello del tubo, ottenne che l'immagine si formasse lateralmente al centro dell'apertura, e potesse in conseguenza esser direttamente veduta senza recare impedimento all'accesso della luce nel tubo. Così venne eliminato il grave inconveniente della costruzione newtoniana che obbligava l'osservatore a cercare l'oggetto in direzione perpendicolare al suo raggio visuale.

L'ampiezza dello specchio e quella della sua distanza focale hanno sull'ingrandimento prodotto da un telescopio la stessa influenza che in un cannocchiale hanno le omonime quantità della lente obbiettiva; quindi è che l'ingrandimento che ha luogo in un telescopio è ancora misurato dal rapporto della distanza focale dello specchio alla distanza focale dell'oculare.

Ma prima che Newton avesse attuato il suo telescopio, l'idea di un cannocchiale a riflessione era sorta nella mente del P. Mersenne, ed indi svolta nei suoi particolari da Gregori in Inghilterra e da Cassegrain in Francia.

Nel telescopio proposto da Gregori la luce, dopo aver formata un'immagine reale ed invertita *zz'* (Fig. 356) nel fuoco dello specchio *ac*, pativa una seconda riflessione sullo specchietto concavo *st*, che distando da *zz'* alquanto più che il suo fuoco principale, la riproduce diritta in *v* attraverso il foro circolare *nn'* scolpito nel mezzo dello specchio *ac* ed ivi si vedeva ingrandita mediante un'oculare.

Nella costruzione poi immaginata da Cassegrain il secondo specchio *st* (Fig. 357) è convesso invece di esser concavo, e giace tra lo specchio *ac* ed il suo fuoco principale. Or dalle leggi della riflessione sugli specchi curvi (n° 326) è facile dedurre di potersi dare tale curvatura e posizione al secondo specchio, che i raggi inviati convergenti dal primo, siano riverberati dal secondo in modo da produrre un'immagine reale e diritta nel tubo che porta l'oculare.

CAPO QUINTO.

NATURA DELLA LUCE.

352. La luce non è coercibile, nemmeno è ponderabile; potrebbe dunque non esser materia, ma una semplice azione a distanza, propria dei corpi luminosi. Or se così fosse, dovremmo necessariamente trovarla simultanea su tutta la lunghezza di qualsiasi retta, che movendo dal corpo luminoso si estendesse indefinita nello spazio. Ma è noto (n° 321) che l'illuminazione impiega un tempo nel dilungarsi dalla sua sorgente; ci è dunque impossibile riguardarla come una semplice azione a distanza, e quindi non potremo concepirla altrimenti che qual effetto di una materia oltremodo attenuata. La luce è materia.

E se la luce è materia, non potrebbe esser priva di tendenza verso tutto ciò ch'è ponderabile senza costituire una seria difficoltà pel sistema della gravitazione universale. L' imponderabilità dunque della luce non è da riguardarsi come assoluta, ma soltanto come relativa all'inadequata squisitezza dei nostri mezzi di misura.

353. Posto che la luce sia una speciale materia, l'illuminazione non potrà esser prodotta che per emissione di questa materia dai corpi luminosi, o per mezzo di onde attuate in un fluido *luce* diffuso in tutto lo spazio, e la cui incoercibilità sarebbe dichiarata dal dover essere estremamente raro ed estremamente elastico, perchè le sue onde si movessero colla velocità di 170000 miglia a minutò secondo. La luce non è emessa.

Or se la luce è materia emessa dai corpi luminosi, i suoi raggi dovranno essere le traiettorie delle sue molecole; le quali inerti come quelle di ogni altra specie di materia, non potranno staccarsi dal corpo luminoso se non per impeto che questo vi avrà trasfuso. E mentre saranno così proiettate nello spazio ambiente, non cesseranno di tendere verso il corpo di

cui facevano parte. Quindi il loro moto non potrà essere che risultante di due opposte azioni, e sotto questa veduta riesce malagevole a concepirlo indipendente (n° 321) dalla natura e grandezza della sorgente luminosa.

Stando sempre nell'ipotesi che la luce sia una materia emessa, la riverberazione, che soffre nell'incontro dei corpi, non sarà che rimbalzo delle sue molecole, e questo cangiamento di moto o sarà un effetto meccanico dell'urto a simiglianza di ciò che avviene nei corpi elastici, o sarà prodotto da ripulsione molecolare del corpo illuminato.

La prima di queste due supposizioni fu giustamente rigettata da Newton, autore del sistema dell'emissione. Ed in vero, considerando che l'arte non altrimenti sa rendere specchiante una superficie, che facendovi un'infinità di sottilissimi solchi, le cui cavità se riescono insensibili al tatto ed all'occhio nudo, sono enormi quando vengono comparate all'infinitesimo diametro della molecola luminosa, è chiaro che le normali ai diversi punti della superficie di uno specchio piano non saranno realmente parallele tra loro, nè quelle menate alla superficie di uno specchio sferico convergeranno tutte al centro di curvatura. Quindi è che se il rimbalzo delle molecole luminose fosse effetto del loro urto contro la superficie del corpo illuminato, gli specchi o non dovrebbero produrre immagini, o darle assai diverse da quelle che realmente sono, e che d'altronde presuppongono tutte parallele tra loro le normali ad uno specchio piano, e tutte convergenti al centro di curvatura quelle menate ad uno specchio sferico.

Al contrario supponendo una forza ripulsiva tra le molecole della luce e quelle della materia ponderabile, non solamente gli esilissimi solchi esistenti sulle superficie meglio forbite rimarranno senza effetto, ma la legge della riflessione speculare ne diverrà un corollario. Imperocchè riguardando la velocità della molecola luminosa lungo il raggio *bc* (Fig. 309) come risultante di due, l'una diretta secondo la normale *hc* alla superficie riflettente, l'altra secondo l'intersezione *rc* del piano normale *bch* col piano tangente il punto d'incidenza *c*,

questa ultima componente resterà illesa dalla forza ripulsiva della superficie, mentre l'altra ne verrà continuamente scemata. Così la molecola di luce, entrando nella sfera di azione della forza ripulsiva, comincerà a deviare dal cammino rettilineo e seguirà la sua via per l'arco *zc*; e quando l'ultimo residuo della componente normale della velocità sarà sparito, allora la componente tangenziale, rimasta intatta, combinandosi coll'azione continua della forza ripulsiva restituirà gradatamente alla molecola di luce la velocità che aveva, spingendola per l'arco *cx* simmetrico a *cz*. Quindi i prolungamenti degli estremi di questi archi, e che formano il raggio incidente *bz* ed il raggio riflesso *xd*, dovranno trovarsi in un medesimo piano colla normale *hc*, e faranno con questi angoli eguali. In questo modo le molecole di luce rimbalzeranno dalla superficie prima di toccarla, e quindi le piccole ineguaglianze delle superficie speculari non potranno influire sulla direzione del raggio riflesso.

Affinchè dunque la legge della riflessione speculare sia conciliabile col sistema dell'emissione, bisogna necessariamente supporre una forza ripulsiva tra la materia dello specchio e le molecole della luce.

Quanto poi ai fenomeni di rifrazione bisognerà supporre che una forza molecolare attrattiva esista tra le molecole della luce e quelle dei corpi trasparenti, imperocchè una forza ripulsiva od una semplice resistenza meccanica farebbero, in contraddizione del fatto, vieppiù allontanare dalla normale di incidenza una molecola di luce che passasse dal vuoto in un corpo rifrangente. Ponendo dunque che questa attrazione esista, facciamoci ad indagarne le conseguenze nel passaggio di una molecola luminosa dal voto in un corpo rifrangente. Sia *lz* (Fig. 338) il cammino della molecola nel voto, e *cc*, *c'c'* rappresentino i limiti dell'attrazione molecolare del corpo rifrangente, rispetto alla superficie *ab* da cui lo supponiamo terminato. Appena la molecola di luce toccherà in *z* il limite superiore della sfera di attrazione, la componente normale della sua velocità comincerà a crescere, e perverrà al suo valore

massimo nel punto di emergenza s dal limite interno della stessa sfera di attrazione. Per questo continuo aumento della componente normale della sua velocità la molecola di luce seguirà tra i punti z ed s e con moto accelerato un cammino curvilineo concavo verso la superficie del mezzo rifrangente, ed a cui negli stessi punti estremi z ed s saranno tangenti il raggio incidente lz ed il raggio rifratto sr.

Se in vece la molecola di luce passasse da un mezzo rifrangente in un altro, si troverebbe sottoposta alla differenza di attrazione dei due mezzi; la quale secondochè positiva o negativa, renderebbe nel passaggio il moto della molecola accelerato o ritardato ed ivi la constringerebbe a camminare per una curva concava o convessa verso il secondo mezzo. Considerando dunque la rifrazione quale effetto di forza attrattiva, il deviamento che un raggio di luce soffre nel passare da un mezzo nell'altro, ne risulta come necessaria conseguenza.

In tutti i casi però la componente tangenziale della velocità della molecola luminosa rimanendo inalterata, la sua espressione nell'incidenza dovrà pareggiare quella che le competerà dopo l'eseguita rifrazione. Laonde chiamando u la velocità della molecola nel mezzo d'incidenza, α l'angolo della sua direzione colla normale, v la sua velocità nel mezzo in cui entra, ed α' l'angolo che colla stessa normale fa il raggio rifratto, sarà $u\,\mathrm{sen}\,\alpha$ la componente tangenziale nell'incidenza e $v\,\mathrm{sen}\,\alpha'$ il suo valore dopo l'eseguita rifrazione; quindi:

$$u\,\mathrm{sen}\,\alpha = v\,\mathrm{sen}\,\alpha', \quad \text{donde} \quad u : v = \mathrm{sen}\,\alpha' : \mathrm{sen}\,\alpha.$$

Ma le velocità u e v sono dichiarate costanti dall'esperienza; tale sarà dunque il rapporto $\mathrm{sen}\,\alpha' : \mathrm{sen}\,\alpha$. E così l'esistenza di un indice di rifrazione diviene un effetto della supposta forza attrattiva.

La quale forza, stante che la rifrazione si mostra dipendente (nº 328) dalla densità e natura del mezzo, l'esprimeremo col prodotto dk, di cui il fattore d indica la parte dovuta alla densità del mezzo rifrangente e k quella che spetta alla sua natura. Quindi la velocità v che la molecola luminosa posse-

derà nel punto s (Fig. 338) in cui tocca il limite interno della forza attrattiva del mezzo rifrangente, sarà somma della sua velocità iniziale u, e dell'altra $dk\theta$ (n° 38) che avrà acquistata percorrendo l'arco zs, nel tempo θ; sarà dunque:

$$v = u + dk\theta \text{, donde } v^2 = u^2 + 2dk(u\theta + \tfrac{1}{2}dk\theta^2).$$

Or lo spazio zs, che indichiamo con e, dovendo esser somma dello spazio $u\theta$ descritto per opera della velocità iniziale u, e dello spazio $\frac{1}{2}dk\theta^2$ percorso mercè la forza acceleratrice dk, avremo:

$$e = u\theta + \tfrac{1}{2}dk\theta^2;$$

valore, che sostituito nella seconda delle due ultime equazioni, ci dà:
$$v^2 = u^2 + 2dke.$$

Ma se n è l'indice di rifrazione, sarà $v = nu$; e questo valore sostituito nell'equazione precedente, la trasforma in:

$$u^2(n^2 - 1) = 2dke;$$

donde:
$$n^2 - 1 = \frac{2dke}{u^2}, \text{ ed } \frac{n^2 - 1}{d} = \frac{2ke}{u^2}.$$

All'espressione di $n^2 - 1$ si è dato il nome di *forza rifrangente*, e si è chiamato *potere rifrangente* il valore di $\frac{n^2-1}{d}$.

Or queste deduzioni di un principio puramente ipotetico hanno dato purtuttavia origine a notevoli risultamenti sperimentali. Così Biot ed Arago nelle loro ricerche sugl'indici di rifrazione dei corpi aeriformi trovarono che: *la forza rifrattiva di un gas è proporzionale alla sua densità*, vale a dire che: *il potere rifrangente di un gas è costante sotto qualunque temperatura e pressione*. Venti anni dopo, Dulong tornando sulla stessa quistione, riformava il fatto scoverto da Biot ed Arago, e trovava inoltre —1°. *Non esistere verun rapporto tra le forze rifrattive e le densità dei diversi gas* —2°. *Che la forza rifrattiva di una mescolanza di gas è eguale alla somma delle forze rifrattive dei fluidi mescolati; e che in conseguenza l'aria,*

la quale si trova in questo caso, è una miscela anzichè chimica combinazione di ossigeno ed azoto — 3°. Che la forza rifrattiva di un composto gassoso riesce talvolta maggiore, e tal'altra minore delle forze rifrattive dei componenti — 4°. Che il potere rifrangente di una sostanza nello stato liquido è più grande di quella che essa possiede nello stato gassoso.

Continuando l'esame degli effetti di una forza attrattiva esistente tra le molecole della luce e quelle del mezzo rifrangente, consideriamo la molecola luminosa nell'atto di emergere da un dato mezzo PO (Fig. 339). Sia α l'angolo che la sua traiettoria *mn* forma colla normale al punto di emergenza, sarà $v\cos\alpha$ la componente normale della velocità v con cui la molecola luminosa percorre il mezzo PO. Questa componente si troverà allora diminuita della velocità $\sqrt{2dke}$ dovuta all'azione del mezzo, ed in conseguenza la molecola luminosa non potrebbe emergere, se mai si avesse:

$$v\cos\alpha - \sqrt{2dek} = 0.$$

Or ponendo che questa equazione sia soddisfatta, ne avremo dietro la sostituzione di $u\sqrt{n^2-1}$ a $\sqrt{2dke}$, e di nu a v;

$$\cos\alpha = \frac{1}{n}\sqrt{n^2-1} = \sqrt{1-\frac{1}{n^2}}.$$

Quindi $\operatorname{sen}\alpha = \frac{1}{n}$; vale a dire che ne risulta lo stesso *angolo limite* che abbiamo trovato come conseguenza della legge di Cartesio.

Parrebbe dunque che l'ipotesi newtoniana di una forza attrattiva tra le molecole della luce e quelle dei mezzi rifrangenti fosse un concetto così felice da seguirne quali necessarie deduzioni tutti i fenomeni di rifrazione empiricamente conosciuti. Ma la luce nell'incontrarsi coi corpi diafani non si rifrange per intero, una parte ne viene riverberata; e poichè questa porzione di luce è perfettamente simile all'altra, non è possibile concepire come essa sia ripulsa dal mezzo rifrangente, mentre l'altra ne viene attratta. A toglier di mezzo

questa gravissima difficoltà non vi era altro spediente che quello degli *accessi di facile riflessione e facile rifrazione* immaginati da Newton, e che consistevano nel supporre che ogni molecola di luce lungo la via che percorre, si trovasse disposta ora ad esser ripulsa ed ora ad essere attratta. Egli è vero che questo concetto non sembrerà parto di una mente sana, quando si consideri risultare dal fatto degli anelli colorati (di cui diremo nel capo seguente) che un tale avvicendamento di accessi dovrebbe ripetersi milioni e milioni di volte in ogni minuto secondo; purtuttavia vi è in esso tanta necessità logica pel sistema dell'emissione, che o bisognava accettarlo non ostante la sua stranezza, o rigettare il sistema come inammissibile.

Ma prima che questo sistema fosse propugnato da Newton, era stato già dichiarato impossibile da un fatto scoverto nel 1665 dal P. Grimaldi, professore di Fisica nell'Università di Bologna. Fatti entrare per piccoli fori in una camera oscura due fascetti di raggi solari, si taglino con un piano menato a tale distanza dai fori che le projezioni delle penombre che accompagnano i due coni di luce, vi appariscano intersecate: allora si vedrà che nel loro spazio comune *abce* (Fig. 358) le penombre sono più lucide che in ogni altro punto, e presentano viceversa la massima oscurità negli archi *bce* e *bae*; e poichè l'accrescimento di luce nell'area *abce*, e la sua diminuzione nel contorno che la circoscrive, spariscono chiudendo uno qualunque dei due fori, è chiaro che queste fasi di luce dipendono unicamente dall'incontro dei raggi. Or se questi non sono che traiettorie delle molecole luminose, l'effetto del loro incontro sarà quello di un urto tra le molecole che li percorrono; e se due corpi non possono ridursi al riposo incontrandosi sotto un angolo assai acuto, sarà del pari impossibile un'oscurità prodotta da raggi che vanno similmente ad incontrarsi. Il fatto scoverto dal Grimaldi è dunque un impossibile meccanico nel sistema dell'emissione.

Nuovi fatti, consimili a quello scoperto dal fisico bolognese, avevano già scemata la fede pel sistema dell' emissione,

quando Arago pensò il modo di sottoporlo ad una pruova decisiva. Se la luce è materia emessa dai corpi luminosi, la rifrazione non potrà essere che effetto di forza attrattiva, ed in conseguenza la molecola luminosa dovrà correre più celere nei mezzi che più fortemente rifrangono. Se al contrario la luce non è che movimento di ondulazione in un fluido diffuso in tutto lo spazio, la sua rifrazione egualmente che quella del suono (nº 183) sarà prodotta da una diminuita celerità di moto nel mezzo che vieppiù rifrange. Premesso ciò, immaginiamo due centri luminosi a piccola distanza tra loro e situati sopra una stessa verticale, orizzontalmente proiettata in *a* (Fig. 340), e che ad essi dirimpetto stia uno specchietto piano verticale, rappresentato da *bc*. Poniamo che lo specchio possa descrivere l'angolo *abc'*, in un tempo comparabile a quello in cui la luce va dalle sorgenti allo specchio; e che i raggi della sorgente superiore prima di giungervi sieno costretti a correre per una massa di acqua, mentre quelli della sorgente inferiore vanno tuttavia per l'aria. Allora, se la luce è materia emessa, i raggi della sorgente superiore arriveranno allo specchio prima degli altri; e perciò se i primi lo raggiungono nella posizione *bc*, i secondi lo raggiungeranno in *bc'*: quindi l'immagine *g* della prima sorgente dovrà vedersi a sinistra dell'immagine *g'* della seconda. Se poi la luce è materia vibrante, i raggi della sorgente superiore perverranno allo specchio più tardi che quelli dell'inferiore; e l'immagine prodotta dai primi dovrà vedersi a destra dell'altra data dai secondi. Questa pruova è stata fatta primieramente da Foucault, indi da Fizeau e Bréguet; e sempre i risultamenti sono stato conformi al principio delle onde.

La luce dunque non è materia emessa.

La luce è vibrazione.

353. Non rimane dunque che a riguardar la luce come moto di onde generate dai corpi luminosi in un fluido, *l'etere*, diffuso in tutto lo spazio, ed incoercibile perchè raro ed elastico estremamente.

E cominciando dall'indipendenza della celerità della luce dalla natura della sorgente luminosa, che riesce così difficile

a concepirsi nel sistema dell'emissione, la troviamo viceversa nel sistema delle onde una necessaria conseguenza di questa specie di moto (n° 179). E se nel primo sistema fa d'uopo immaginare tante diverse nature di molecole luminose, per quanti raggi diversamente colorati ci presenta la luce scomposta dal prisma; pel secondo al contrario, dopo che i fenomeni di interferenza ci avranno mostrato che ad ogni colore corrisponde una speciale lunghezza di onda luminosa, troveremo nella differenza di queste lunghezze una ragione sufficiente della varia impressione prodotta sull'occhio, come nella diversa lunghezza delle onde sonore (n° 185) abbiamo la ragione dei suoni gravi ed acuti.

Nel sistema delle onde la riverberazione speculare è analoga all'eco, e la riverberazione diffusa è simile alla risonanza. Questa comparazione è sostenuta dalle seguenti analogie — 1° Nell'eco l'intensità e la direzione del suono riflesso suppongono un centro virtuale simmetrico, rispetto alla superficie riflettente, al vero centro di vibrazione; e nella vibrazione lucida operata da uno specchio piano, l'oggetto e la sua immagine formano due figure simmetriche rispetto al piano dello specchio — 2° Le onde produttrici dell'eco conservano la lunghezza che avevano prima dell'incidenza e quindi il grado del suono; e la luce specularmente riflessa ha lo stesso colore ed in conseguenza la medesima lunghezza di onda della luce incidente — 3° Allorchè l'ostacolo che si presenta sulla via del suono, non è scosso dall'impulso delle onde, queste ne vengono rimbalzate e l'eco si produce; ma se le onde riescono a scuotere l'inerzia molecolare dell'ostacolo, v'imprimeranno un moto di vibrazione che si appella *risonanza*, e che allora riesce vieppiù spiccato quando il suono incidente è per avventura dello stesso grado di quello che il corpo urtato è disposto a concepire (n° 200). Or la riflessione speculare è simile all'eco, perchè le onde lucide non valgono a far vibrare le superficie levigate; ma se l'incontro avviene con superficie scabrose, le cui parti salienti possono esser facilmente scosse dall'urto delle onde, allora la diffusione avrà luogo seguendo le

stesse leggi della risonanza, vale a dire che il colore della luce riverberata sarà quello delle vibrazioni che la superficie di incidenza potrà concepire. Ed analogamente al fenomeno di risonanza prodotto dal campanello di Savart (n° 200), si trova che un corpo successivamente illuminato dai diversi elementi dello spettro solare, non prende una tinta vivace se non quando è colpito dai raggi che hanno un colore simile al suo. E se i corpi bianchi si mostrano egualmente eccitabili dalle onde luminose di qualsiasi colore, sono in ciò simili alle casse degli strumenti a corde che rispondono all' unisono delle onde sonore di qualunque grado.

Rispetto poi allo spezzamento che i raggi patiscono nel passare da un mezzo in un altro, l'analogia che l'ipotesi delle onde luminose ha col fatto delle onde sonore, è così perfetta che non potremmo altrimenti dichiarare la rifrazione della luce nel sistema delle onde, se non ripetendo tutto ciò che del consimile fenomeno del suono abbiamo detto nel n° 183. Soltanto è da osservarsi che se la rifrazione del suono è indipendente dal suo grado, ciò deriva (come il Cauchy ha dimostrato) dall'essere grandissima rispetto al raggio delle azioni molecolari la lunghezza delle minime onde sonore, mentre per le onde luminose, la cui massima lunghezza raggiunge appena 0,000645 di millimetro, avviene che nel loro cammino per un dato mezzo le onde più corte debbono andar meno celeri delle più lunghe. Così la varia rifrangibilità dei raggi di diverso colore, e quindi la dispersione della luce, diviene nel sistema delle onde una conseguenza della loro varia lunghezza.

A ciò si aggiunga che il fatto della luce in parte riflessa ed in parte rifratta dalla superficie di separazione di due mezzi, fatto inconciliabile col sistema dell'emissione senza lo strano ripiego degli *accessi*, è al contrario perfettamente conforme al principio delle onde, stantè che la teoria matematica di questa speciè di movimento dimostra come da un medesimo sistema di onde incidenti prendano origine un sistema di onde riflesse ed un altro di onde rifratte.

Evvi purtuttavia un'essenziale differenza tra la percezione

dei suoni e quella della luce. Ed in vero, il moto che la vibrazione di un centro comunica al mezzo ambiente, e che si propaga per mezzo di onde, risulta, come ha dimostrato il Cauchy, da due oscillazioni molecolari, l'una normale alla superficie dell'onda, l'altra perpendicolare al suo raggio; dimodochè se *ac* (Fig. 361) rappresenta la lunghezza dell'onda sopra un raggio sonoro o luminoso, la composizione dei due indicati movimenti farà oscillare la molecola del mezzo conduttore per la curva sinuosa *asec*. Or gli organi dell'udito e della vista sono impressionabili da ciascuno dei due moti componenti?

Nel n° 201 abbiamo veduto che i suoni possono *interferire* ossia addizionare talvolta le loro impressioni sull'organo dell'udito e tal'altra distruggerle a vicenda; e che all'uopo i raggi delle rispettive onde debbono procedere sulla stessa via nel primo caso, e per vie opposte nel secondo. Or queste condizioni, indispensabili per l'attuazione dell'interferenza sonora, dimostrano chiaramente che l'organo dell'udito non è impressionabile se non dal moto normale alla superficie dell'onda.

Rispetto poi all'organo della vista la quistione è interamente risoluta da un esperimento di Fresnel, che costituisce uno dei fatti più rivelanti dell'Ottica moderna. Ad un foro scolpito nella parete di una stanza oscura si adatti una lente convergente, per la quale non si facciano passare che raggi luminosi omogenei, e siano quelli della zona rossa dello spettro: ad essi, dopo la loro intersezione nel fuoco *s* della lente (Fig. 363) si oppongano i due specchi piani AB ed AC, a vicenda inclinati sotto un angolo assai ottuso, ed i due fasci luminosi che ne verranno riverberati, si ricevano sopra un setto opaco *pq*. Su questo setto si vedranno delineate delle frange alternamente rosse ed oscure, le quali non possono esser prodotte che dall'incontro dei raggi appartenenti ai due sistemi di fasci riverberati, essendochè spariscono appena che il fascio rinviato da uno qualunque degli specchi venga intercettato prima d'incontrarsi coll'altro.

Or gli specchi essendo inclinati ad angolo assai ottuso, i

raggi da essi riverberati non potranno incontrarsi che ad angoli molto acuti; e mercè questa loro inclinazione i moti normali ai raggi delle onde potranno a vicenda rinforzarsi o distruggersi, secondochè si troveranno cospiranti od opposti. Un fatto consimile potrebbe aver luogo nelle onde sonore, senza che l'organo dell'udito potesse giammai sentirlo. Al contrario l'occhio che non conosce oscurità prodotta da raggi che per opposte vie vengono ad incontrarsi, ed avverte al contrario quella che ha luogo nell'incontro dei raggi per angoli assai acuti, dimostra non esser sensibile che al solo moto normale al raggio dell'onda luminosa, come l'organo uditivo lo è solamente pel moto normale alla superficie dell' onda sonora.

Dalle quali cose deriva che se due raggi luminosi, come *ac* e *bc* (Fig. 361), s' incontrano mentre le vibrazioni normali alle loro direzioni si trovano di essere opposte, queste si distruggeranno a vicenda ed il punto d'incontro dei raggi apparirà oscuro; al contrario le stesse vibrazioni si sommerebbero insieme se fossero cospiranti, e nell'incontro dei raggi (Fig. 362) produrrebbero una luce più intensa. Il primo di questi due casi avrà luogo, quando uno dei raggi sia più lungo dell'altro di un numero dispari di semionde, ed il secondo allorchè i due raggi siano egualmente lunghi, o almeno differenti per numero pari di semi onde.

Or queste illazioni si trovano esattamente verificate nell'esperimento di Fresnel; imperocchè se per lo spigolo A dell'angolo diedro formato dai due piani speculari, e pel punto medio *k* dell'intervallo che separa le due immagini *m* ed *m'* del punto raggiante *s*, si conduca un piano, troveremo che nella sua intersezione *t* col setto *pq* starà una frangia brillante; ai lati di essa si vedranno due frange oscure; indi verranno altre due frange brillanti e così di seguito. Or i raggi che partiti da *s* e riverberati dagli specchi AC ed AB vanno ad incontrarsi in un punto del setto *pq*, si troveranno di aver percorso lo stesso cammino che avrebbero fatto se fossero partiti l'uno da *m* e l'altro da *m'*. Quindi i raggi che s'incontreran-

no in t, avranno percorse eguali lunghezze di cammino; saranno dunque partiti in un medesimo istante dal punto s, ed in conseguenza con una stessa fase di vibrazione; e poichè il tempo tra l'istante della partenza e quello dell'incontro è stato lo stesso per essi due, così un'identica fase di vibrazione avranno ancora nel momento del loro incontro. Quelli poi che sullo stesso setto pq s'incontreranno in luoghi diversi da t, produrranno frange brillanti od oscure, secondochè le differenze delle vie percorse corrisponderanno a numeri pari od impari di semionde.

Or perchè il fatto sia conforme a questa teoria, fa d' uopo che le differenze di cammino, rispetto ai luoghi occupati dalla serie delle frange, vadano crescendo in progressione aritmetica. Perciò dai luoghi m ed m' (Fig. 364) occupati dalle due immagini conduciamo fino ad incontrare il piano pq, su cui stanno le frange, le rette ms ed $m's'$ parallele a kt; e fatte $mm'=c$, $kt=b$, indichiamo con x la distanza tn di una frangia dal piano di simmetria kt. I due triangoli rettangoli msn, $m's'n$ ci daranno:

$$mn=\sqrt{b^2+(x+\tfrac{1}{2}c)^2}\ ,\quad m'n=\sqrt{b^2+(x-\tfrac{1}{2}c)^2}\ ,$$

valori, che svolti colla formola del binomio e limitate le serie ai secondi termini, stante che x e c sono quantità piccolissime rispetto a b, diverranno:

$$mn=b+\frac{(x+\frac{1}{2}c)^2}{2b}\ ,\quad m'n=b+\frac{(x-\frac{1}{2}c)^2}{2b}\ ;$$

donde: $$mn-m'n=\frac{cx}{b}.$$

E perchè la differenza $mn-m'n$ riproduca successivamente i valori $\frac{1}{2}l$, $\frac{2}{2}l$, $\frac{3}{2}l$, ecc., corrispondenti alla 1ª frangia oscura, alla 2ª lucida, alla 3ª oscura, ecc. numerate dalla frangia centrate in t, è necessario che le loro distanze x dal piano di simmetria kt siano crescenti in progressione aritmetica; la qual cosa è stata verificata da Fresnel con accurate misure micrometriche.

I valori così definiti delle distanze x sono riusciti crescenti dal rosso al violetto rispetto alle frange di medesimo ordine prodotte dai diversi elementi prismatici. Quindi si è compresa la ragione delle tinte iridate che esse prendono quando s'impiega la luce indecomposta del sole, e si son potute calcolare in frazioni di millimetro (come si vede nella seguente tavola) le lunghezze l delle onde corrispondenti ai diversi raggi dello spettro.

LIMITI dei colori principali.	VALORI estremi di l	COLORI principali.	VALORI medii di l.
Violetto estremo . . .	0,000406	Violetto	0,000423
Violetto-indaco. . . .	0,000439	Indaco.	0,000449
Indaco-azzurro	0,000459	Azzurro	0,000475
Azzurro-verde	0,000494	Verde	0,000521
Verde-giallo	0,000532	Giallo	0,000551
Giallo-arancio	0,000571	Arancio	0,000583
Arancio-rosso.	0,000596	Rosso	0.000620
Rosso estremo	0,000645		

Primo sperimento decisivo.

354. Prima che Arago avesse concepito l'esperimento (n° 352) più tardi attuato da Fizeau e che pose fuor di dubbio il fatto della minor celerità della luce attraverso i mezzi più rifrangenti, egli ne aveva ottenuta una pruova indiretta ma non meno decisiva mercè l'apparecchio di Fresnel qui sopra descritto. Imperocchè ponendo una lamina di vetro sul cammino dei raggi riflessi da uno degli specchi e prima che si fossero incontrati con quelli riflessi dall'altro, egli trovava che la frangia centrale si spostava movendo verso lo specchio di cui erasi intercettata la luce. Ciò dimostrava che per produrre la frangia centrale, ai raggi intercettati bisognavano raggi liberi che avessero fatto maggior cammino e quindi impiegato un maggior tempo, e che in conseguenza l'interposizione del vetro aveva cagionato un ritardo nel moto della luce.

CAPO SESTO.

ANELLI COLORATI.

355. Sulle bolle di sapone, che i fanciulli si divertono a produrre, si veggono degli anelli concentrici, variopinti dai colori dell'iride, e che in mezzo chiudono un cerchietto oscuro che continuamente si allarga, finchè la bolla ivi non si rompa. Le si ottengono, com'è noto, intingendo la punta di un cannello nel sapone disciolto, e soffiandovi dentro per l'altro estremo; così per l'impeto del soffio la goccia sospesa al cannello si distende in uno strato sferico, atteso l'aumento di coesione che l'acqua ha ricevuto dal corpo che vi sta disciolto. Ma le molecole del liquido non avendo con ciò perduta la loro mobilità, scendono lentamente pei lati della bolla, e così ne accrescono la spessezza in basso, e l'assottigliano in alto precisamente là dove apparisce la macchia centrale oscura. Quindi è chiaro che la produzione degli anelli va congiunta all'esistenza di uno strato trasparente che ha sottigliezza continuamente varia; e perciò avviene che si mostrino ancora sulla falda di un liquido assai volatile, distesa con un pennello sopra un corpo di colore oscuro, od anche intorno al luogo di contatto di una lente di lunghissimo foco premuta contro un piano. Fatti.

Questi fatti avevano già fissata l'attenzione di Boyle e di Hooke, quando Newton vedendoli riprodotti tra due lenti ad uso di obbiettivi, e che per azzardo aveva premute l'una contro l'altra, si fece a studiarli accuratamente. Egli usò di una lente di lunghissimo foco premuta contro un piano di cristallo ed ebbe così l'agio di osservare che nel luogo di contatto della lente col piano si produce una macchia circolare oscura, intorno alla quale vanno disponendosi degli anelli diversamente colorati. Questa varietà di tinte già accennava che i

diversi elementi della luce debbono produrre anelli di diverso diametro, perciò Newton si fece a studiarne la produzione impiegando successivamente i diversi elementi dello spettro, e n'ebbe i risultamenti che seguono.

— 1° Facendo agire i raggi di una qualunque delle zone dello spettro, e guardando gli anelli per luce riflessa, si vedrà una macchia oscura nel luogo di contatto della lente col piano, circondata da anelli alternamente lucidi ed oscuri, in modo che i raggi rossi dello spettro daranno anelli rossi ed oscuri, i gialli ne produrranno di gialli ed oscuri, e così di seguito.

E se gli anelli si guardino per luce rifratta, allora la macchia centrale comparirà del colore della luce incidente ed i luoghi prima occupati dagli anelli lucidi lo saranno da anelli oscuri e viceversa. Questi anelli intanto non hanno quella tinta vivace che si osserva negli anelli veduti per luce riflessa.

— 2° Adoperando successivamente i diversi elementi dello spettro, si trova che il diametro di ciascun anello va decrescendo dal rosso estremo all'estremo violetto. Quindi è che sotto l'azione della luce bianca gli anelli prodotti dai diversi elementi prismatici non potendosi soprapporre l'uno all'altro, debbono necessariamente presentarsi sotto forma di zone iridate; e la macchia centrale, veduta per luce rifratta, comparirà bianca perchè in essa coesistono tutti i colori della luce primitiva.

— 3° Misurando i diametri dei successivi anelli lucidi ed oscuri veduti per luce omogenea riflessa, si trova che i loro quadrati seguono rispetto agli anelli lucidi la serie dei numeri dispari 1, 3, 5, ecc. e rispetto agli anelli oscuri quella dei numeri pari 2, 4, 6, ecc. E poichè agli anelli lucidi per luce omogenea riflessa corrispondono quelli che appariscono oscuri per luce rifratta e viceversa, così è chiaro che per questa seconda specie di anelli reggeranno reciprocamente le stesse due serie precedenti.

Or se *on* (Fig. 365) rappresenta il raggio di un anello prodotto da luce omogenea, e che potremo supporre eguale alla

corda *om* di cui è proiezione, avremo, indicando con R il raggio di curvatura della faccia *cod* della lente;

$$mn = \frac{\overline{on}^2}{2R};$$

formola, che dà pel luogo occupato dall'anello di un raggio *on* la spessezza della falda di aria giacente tra la lente ed il piano. E così Newton, determinato che ebbe per ciascun elemento prismatico il diametro del 1° anello lucido, potè definire in frazioni del pollice inglese e che nella tavola seguente si veggono ancora tradotte in frazioni di millimetro, le corrispondenti spessezze della falda di aria.

NOMI DEI COLORI.	Spessezza dell'aria in milionesimi di pollice inglese.	Spessezza dell'aria in milionesimi di millimetro.
Violetto estremo	3,997	101,51
Violetto-indaco.	4,323	109,80
Indaco-azzurro	4,513	114,64
Azzurro-verde	4,841	123,97
Verde-giallo.	5,237	133,01
Giallo-arancio	5,618	142,70
Arancio-rosso	5,686	148,95
Rosso-estremo	6,344	161,15

Ed è degno di nota che i numeri contenuti nella 3ª colonna di questa tavola sieno quattro volte minori delle corrispondenti lunghezze dell'onda luminosa, date nella tav. a pag.552

Dalla stessa formola suesposta si rileva ancora che pei diversi anelli lucidi ed oscuri dati da un medesimo elemento luminoso le corrispondenti spessezze della falda di aria seguono la ragione de'quadrati dei loro diametri.

— 4° Il diametro di ciascun anello varierà ancora in ragione inversa dell'indice di rifrazione della sostanza posta tra la lente ed il piano; quindi sarà massimo nel voto, ed andrà poi scemando a misura che maggior forza rifrangente avrà la sostanza interposta. Così l'acqua che rifrange più dell'aria, produce anelli di minor diametro, e nella ragione di 3 a 4

ch'è appunto l'inversa dei rispettivi indici di rifrazione. Della qual cosa potremo agevolmente chiarirci, se introdotta che sia una goccia di acqua tra la lente ed il piano, ci faremo ad osservare gli anelli prima che il liquido, attratto dalla capillarità verso il punto di contatto dei due solidi, finisca di circuirlo interamente; imperocchè allora gli anelli appariranno spezzati nel luogo di contatto dell'aria coll'acqua.

Tutte queste leggi son vere, quando sì il piano che la lente hanno un indice più grande o più piccolo di quello della sostanza interposta; e questo è stato sempre il caso degli esperimenti di Newton. Ma se gl'indici dei tre mezzi formassero una serie crescente o decrescente, allora la macchia centrale riuscirebbe lucida per luce riflessa ed oscura per luce rifratta. E ciò si ebbe primieramente da Young mercè l'introduzione dell'olio di sassofrasso tra una superficie di flint ed un'altra di crown. Più tardi Soleil presentò lo stesso fatto sotto una forma più spiccata, interponendo l'olio di garofano tra un piano, formato da un pezzo di flint ed uno di crown ed una lente di flint che li toccava in un punto della linea di loro congiunzione; così si ebbe la macchia centrale metà lucida e metà oscura.

Teoria. 356. Newton cercò spiegare nel sistema dell'emissione il fenomeno degli anelli colorati, immaginando che ogni molecola di luce patisse accessi di facile riflessione e facile rifrazione, varii secondo l'elemento prismatico a cui appartiene e la natura del mezzo che percorre. Questa ipotesi che, limitato il fenomeno alla forma conosciuta da Newton, poteva ritenersi come necessaria conseguenza del sistema dell'emissione, divenne inammissibile appena che Young ebbe scoverto il fatto degli anelli a centro lucido, veduti per luce riflessa.

Hooke che prima di Newton aveva esaminato il fenomeno degli anelli colorati, ne aveva intuita la vera cagione attribuendoli a pulsazioni delle onde luminóse; e questo concetto fu poi mirabilmente chiarito da Young il quale vide nel fenomeno degli anelli un fatto d'interferenza, determinato da una legge che va formolata nel seguente modo: *l'onda riflessa dalla superficie di separazione di due mezzi, sarà continuazio-*

ne dell'onda incidente, o prenderà opposta direzione di moto, secondo che il mezzo d'incidenza sarà più o meno denso di quello che la riverbera. E questo principio egli ammise per semplice analogia a ciò che avviene quando una palla elastica dà un urto centrale ad una consimile palla che si trova nello stato di riposo. Allora, com'è noto (n° 67), la palla urtante continuerà a muoversi per la sua via, si metterà in riposo o tornerà indietro, secondo che la sua massa sarà maggiore, eguale o minore di quella della palla urtata; e similmente l'onda luminosa nell'incontrare un nuovo mezzo, continuerà con una parziale riflessione il moto dell'onda incidente, lo trasfonderà tutto in un'onda eguale generata nel secondo mezzo, od una parte ne tornerà indietro con moto di vibrazione opposto a quello d'incidenza, secondo che il primo mezzo avrà forza rifrangente maggiore, eguale o minore di quella del secondo, o in altri termini, secondo che l'etere avrà nel primo mezzo una densità maggiore, eguale o minore di quella che ha luogo nel secondo. Così se l'onda luminosa *amnc* (Fig. 360) incontra in *c* un mezzo più rifrangente del già percorso, l'onda riflessa *cnma*, rappresentata dalla linea punteggiata, avrà moto opposto a quello dell'onda incidente. Ma se il mezzo incontrato in *e* (Fig. 360 bis) sia meno rifrangente, l'onda riflessa *cdea* sarà continuazione dell'onda incidente *amnc*.

Premesso ciò, facciamoci a considerare la produzione degli anelli per luce riflessa. Ponendo che il mezzo intercetto fosse meno rifrangente di ciascuno dei due solidi, l'onda riflessa dalla faccia inferiore della lente e quella riverberata dalla faccia superiore del piano avranno segni contrarii, imperocchè la prima sarà continuazione dell'onda incidente, e l'altra avrà movimento inverso. Perciò nel luogo di contatto della lente col piano i due sistemi di onde riflesse si distruggeranno a vicenda, e daranno origine alla macchia centrale oscura; e lo stesso dovrà aver luogo in tutti i punti della faccia inferiore della lente, pe'quali le onde che ne vengono riflesse si troveranno precedere quelle rinviate dal piano, di un numero pari di semionde. Al contrario nei luoghi in cui la differenza di

cammino per le due specie di onde riflesse pareggerà un numero dispari di semilunghezze, ivi i movimenti dell'etere saranno cospiranti, e produrranno altrettanti anelli lucidi. Or l' onda luminosa riflessa dal piano dovendo percorrere due volte l'intervallo che lo separa dalla lente, prima che incontri l'onda da questa riverberata, ne segue che indicandone con l la lunghezza, gl'intervalli corrispondenti agli anelli lucidi dovranno formare la serie $\frac{1}{4}l$, $\frac{3}{4}l$, $\frac{5}{4}l$, ecc. e quelli degli oscuri dovranno seguir l'altra: $0, \frac{2}{4}l$, $\frac{4}{4}l$, $\frac{6}{4}l$, ecc. Quindi si comprende, perchè gli accessi calcolati da Newton (pag. 555) si trovino 4 volte minore delle lunghezze di onda calcolate da Fresnel (pag. 552).

Che se poi la lente, il mezzo frapposto ed il piano abbiano indici di rifrazione in serie crescente o decrescente, allora le onde riflesse sì dalla faccia inferiore della lente che dalla superiore del piano avranno lo stesso segno, e perciò la macchia centrale risulterà lucida, ed i luoghi degli anelli lucidi ed oscuri saranno scambiati.

Secondo questa spiegazione gli anelli veduti per luce riflessa sarebbero interamente prodotti dal concorso dei raggi riflessi dalla faccia inferiore della lente con quelli riverberati dalla faccia superiore del piano. Or la necessità di questo concorso è messa fuori dubbio da un esperimento di Airy; a chiarimento del quale fa d'uopo premettere che sotto certe condizioni la luce può rimanere talmente modificata (come vedremo in uno dei capi seguenti) da essere incapace di venir riverberata dalla superficie di un dato corpo che incontri sotto un dato angolo: allora la luce si dirà *polarizzata*, e quell'angolo si nomina *angolo di polarizzazione*. Ciò premesso, Airy pose sopra una lamina metallica una lente di lunghissimo fuoco, e vi fè cader sopra un fascio di raggi polarizzati che non potessero venir riflessi nè dalla prima nè dalla seconda faccia della lente: così facendo non si ebbero affatto anelli colorati, ma questi apparvero tosto che i raggi furono inclinati in modo da potersi riflettere sulle facce della lente.

Quanto poi agli anelli veduti per luce rifratta, essi sono

prodotti dall'interferenza dei raggi trasmessi dalla lente e dal piano, con quelli che riverberati successivamente dalle facce prossime del piano e della lente, procedono per la stessa via dei primi. Ed in vero, ponendo che il mezzo interposto fosse meno rifrangente che ciascuno dei due solidi, allora nelle due successive riflessioni vi sarebbero due mutamenti di segno, e l'onda luminosa finirebbe così col prendere il segno che aveva; e se viceversa il mezzo interposto fosse più rifrangente degli altri due, le riflessioni avverrebbero senza cangiamento di segno. Quindi sì nell'uno che nell' altro caso vi sarà perfetto accordo negl' intervalli $0, \frac{2}{4}l, \frac{4}{4}l, \frac{6}{4}l$, imperocchè i due sistemi di onde ivi avranno le differenze di cammino $0, l, 2l, 3l$, ecc.; e perciò saranno lucidi tanto la macchia centrale che gli anelli corrispondenti a'detti intervalli, pei quali sotto l'azione della luce riflessa sono oscuri sì la macchia che gli anelli.

Ma se l'indice del mezzo interposto abbia un valore medio tra quelli degli altri due, allora nelle suddette riflessioni vi sarà un solo cangiamento di segno, e quindi disaccordo negli intervalli $0, \frac{2}{4}l, \frac{4}{4}l, \frac{6}{4}l$. Saranno dunque oscuri e la macchia centrale e gli anelli corrispondenti.

CAPO SETTIMO.

FENOMENI DI DIFFRAZIONE.

357. Poniamo che — *il moto dell'etere in un punto qualunque sia risultante dei moti comunicatigli da tutti i punti dell'onda precedente, agenti come altrettanti centri di vibrazione* — e facciamoci a considerare le conseguenze di questa ipotesi. Principio.

358. Sia O (Fig. 368) il centro di un'onda luminosa MN, ed in B stia l'occhio dell'osservatore su cui come altrettanti centri di vibrazione agiscano i diversi punti della superficie MN. Condotta la OB, che incontrerà la superficie dell'onda in A, Moto rettilineo della luce.

immaginiamo su questa superficie descritte delle zone concentriche determinate dagli archi A*a*, *ab*, *bc*, ecc. tali da rendere le distanze BA, B*a*, B*b*, ecc. crescenti in una progressione aritmetica, la cui ragione pareggi la semilunghezza dell'onda. Così facendo, A*a*, *ab*, *bc*, ecc. risulteranno sempre più piccoli e maggiormente inclinati alla OB, e nella stessa ragione invieranno raggi meno numerosi ed efficaci sul punto B. Ora i raggi che dalle zone *bc* ed *ab* moveranno verso B, ivi giungeranno con opposte fasi di vibrazione, e tutti a vicenda si distruggerebbero, se fossero eguali in numero ed egualmente efficaci; ma quelli che vengono da *bc* sono meno numerosi ed efficaci di quelli che son partiti da *ab*; questi dunque posséderanno un resto di azione dopo aver annullata quella dei primi. E questo residuo di azione sarà poi similmente distrutto da' raggi che muovono dalla zona A*a*, dimodochè dell'azione inviata da tutti i punti dell'onda MN sul punto B, altro non resterà che quella dei punti prossimi alla congiungente il centro luminoso coll'occhio dell'osservatore; vale a dire che l'azione dell'onda luminosa sopra un punto dato, è come se vi arrivasse in linea retta dal suo centro O.

Il moto rettilineo della luce è dunque una conseguenza dell'ipotesi qui sopra enunciata.

Diffrazione prodotta dallo orlo rettilineo di un corpo opaco.

359. Immaginiamo che un fascetto di raggi solari penetrando in una camera oscura incontri un vetro colorato *dc* (Fig. 367) che lasci passare un solo elemento prismatico; il quale, ricevuto dalla lente cilindrica *ab* e quindi concentrato nella sua linea focale proiettata in *f*, vada poi ad incontrare il setto opaco *hl* che gli presenti in *h* un orlo rettilineo, parallelo a quello della linea focale. Seguendo sempre la stessa ipotesi, facciamoci a considerare i fenomeni che l'onda luminosa, interrotta dal setto *hl*, dovrà presentare sopra un piano *kp*, opposto al cammino dei raggi.

Sia MN (Fig. 369) la superficie dell'onda tangente il setto opaco *kl* nel punto *s*, ed O ne sia il centro. Sull'intersezione *bk* di un piano parallelo al setto *hl* e di un altro normale al suo spigolo *h*, prendasi un punto *p*, pel quale la somma

os+*sp* superi la *op* della lunghezza di una semionda. Così tutti i raggi provvenienti dall'arco *es* giungeranno efficaci sul punto *p*, stante che il setto *hl* arresta quelli che potrebbero giungervi dall'arco *sz*, e che in massima parte distruggerebbero l'azione dei primi. Per la presenza dunque del setto *hl* il punto *p* riceve più luce, che non avrebbe senza di quell'impedimento.

Sulla stessa intersezione *bk* consideriamo ancora il punto *q*, tolto in modo che *os*+*sq* superi *oq* di due semionde. I raggi che verso quel punto moveranno dall'arco *es*, e che quelli provvenienti dall'arco *sz* non potranno più distruggere perchè ritenuti dall'ostacolo *hl*, annulleranno dal canto loro la maggior parte dei raggi che vengono dall'arco *ce*; e così per opera del setto *hl* il punto *q* riceverà minor luce di quella che l'onda libera gli avrebbe comunicata.

Procedendo nello stesso modo, troveremo che i diversi punti della *bk* saranno alternativamente lucidi ed oscuri, secondo che le loro distanze dal centro dell' onda differiranno dalle corrispondenti linee spezzate, composte a modo delle *os*+*sp*, *os*+*sq*, ecc. per una quantità impari o pari di semionde. E poichè altrettanto dovrà verificarsi su tutte le rette, che nel campo del fascetto luminoso e nel piano su cui giace la *bk* saranno menate parallele a questa retta; ne segue che in vece di semplici punti si dovranno avere su quel piano delle frange lucide ed oscure. Le quali poichè debbono risultare di un'ampiezza crescente dal violetto al rosso, appariranno necessariamente iridate quando in vece di un solo elemento prismatico s' introduca nella camera oscura la luce indecomposta del sole. E se il piano *bk* si faccia muovere parallelamente a sè stesso, le frange vi si troveranno a distanze variabili dal limite *g* dell'ombra geometrica, imperocchè le loro distanze dal centro *o* dell'onda e dallo spigolo *h* del setto opaco avendo differenza costante, esse dovranno muoversi scorrendo per archi iperbolici che avranno un vertice comune in quello spigolo.

Nè l'ombra che il setto *hl* proietta sul piano *bk*, dovrà esse-

re egualmente oscura in tutta la parte che occupa di quel piano, imperocchè dei raggi potranno ivi giungere dall'arco *sM*. E siccome questi raggi riusciranno meno efficaci a misura che partiranno da punti più lontani da *s*, e che in conseguenza potranno incontrare la proiezione dell'ombra in punti più distanti dal suo limite *g*, così da questo punto procedendo verso *k* dovrà mostrarsi un debole chiarore che andrà tosto ad estinguersi.

Ed in ultimo osserviamo che se in vece della sola linea luminosa prodotta nel fuoco *f* della lente cilindrica (Fig. 367) ve ne fossero parecchie l'una all'altra contigue, allora si avrebbero altrettanti sistemi di frange che soprapponendosi l'uno all'altro si confonderebbero in una luce di tinta uniforme; e si avrebbe così un risultamento conforme al fatto della mancanza delle frange, quando l'ombra, come di ordinario avviene, è prodotta sotto l'azione di una sorgente luminosa che presenta una superficie raggiante di dimensioni finite.

Or tutti questi corollarii dell'ipotesi enunciata nel principio di questo capo, e che fu ideata da Huygens, sono stati verificati da Fresnel mercè l'attuazione dell'esperimento qui sopra immaginato; nè la pruova riuscì meno soddisfacente rispetto alle altre due maniere di diffrazione che ci facciamo a descrivere nei due n[i] seguenti.

Diffrazione mercè di un filo opaco.

360. Rappresenti *ll'* (Fig. 370) il diametro di un filo opaco, situato parallelamente alla linea focale o della lente cilindrica, e sia *nn'* il piano che dovrà ricevere l'ombra prodotta dal filo. Immaginando che gli archi *lc*, *l'c'* dell'onda *cc'* sieno divisi nella ragione di sopra detta, facciamoci a determinare la risultante delle loro azioni sul punto *m* del piano, giacente tra i limiti dell'ombra geometrica *nn'*. Essendo che le lunghezze degli archi *la*, *ab*, *bc*, ecc. vanno decrescendo, mentre si fanno sempre più inclinati ai raggi che possono inviare sul punto *m*, è chiaro che la differenza di una semionda, che ha regolata la ragione di essi archi, farà sì che i raggi inviati dall'arco *bc* siano interamente annullati da quelli che partono da *ab*, e ciò che di questi rimane lo sia da quelli dell'arco *la*; di-

modochè di tutti i raggi inviati dall'arco *lc* sul punto *m* non resteranno efficaci che quelli diretti secondo *lm*. Altrettanto avverrà dei raggi che partiranno dall'arco *l'c'* ; e così la risultante delle azioni degli archi *lc* ed *l'c'* sul punto *m* si ridurrà a quella de'raggi *lm* ed *l'm*. Or se questi raggi vi giungono con una differenza di cammino, eguale ad un numero pari di semionde, quel punto apparterrà ad una frangia lucida; e viceversa farà parte di una frangia oscura se quella differenza sarà data da un numero impari di semionde. Nello stesso campo dell'ombra geometrica vi saranno dunque, come il fatto riferma, delle frange lucide ed oscure, e tutti i punti della linea d'intersezione del piano *nn'* col piano *og*, menato per la linea focale della lente perpendicolarmente al primo, apparterranno ad una frangia lucida tanto più viva, per quanto più sottile sarà il filo che proietta l'ombra. Quindi è che se in vece di una linea si avesse un punto raggiante, e che il corpo opaco avesse forma di piccolissimo disco, questo proietterebbe una ombra circolare a centro lucido. Questo inatteso risultamento, che Poisson deduceva dalle formole di Fresnel, e che poi Arago rifermava con acconcio esperimento, è stato un vero trionfo della teoria delle onde su quella dell'emissione.

E per le cose anzidette è chiaro che qualora fosse intercettata la luce che va radente uno dei lati del filo opaco, le frange giacenti nel campo dell'ombra dovrebbero sparire del tutto. Questo fatto fu osservato la prima volta da Young, e fu quello che lo decise pel sistema delle onde.

Diffrazione per una stretta fenditura.

361. Poniamo che alla stessa sorgente luminosa si presenti una lamina opaca sulla quale stia scolpita una stretta fenditura, messa parallelamente alla linea focale della lente. Ricevendo sopra un piano la falda luminosa ch'emerge da quella fenditura, si vedranno delle frange alternativamente lucide ed oscure occupare un campo più esteso di quello che sarebbe determinato dal cammino rettilineo dei raggi. Sia *aa'* (Fig. 371) l'ampiezza della fenditura, *o* il fuoco della lente, *gh* il piano destinato a ricevere la luce emergente, ed *op* il piano menato per la linea focale della lente e per quella che divide per metà

l'ampiezza della fenditura. Se per una certa distanza del piano *gh* dalla fenditura si abbia rispetto alla sua intersezione *p* col piano di simmetria *op* la differenza *ap—sp* eguale ad una semionda, l'intersezione *p* sarà occupata da una frangia lucida, stante che riceverà azioni cospiranti dagli archi *as* ed *a's*; e lo stesso avrà luogo in ogni maggior distanza del piano *gh* da quello della fenditura. Ma se il primo piano si vada lentamente avvicinando al secondo, la differenza *ap—sp* andrà crescendo, e secondo che questa riuscirà eguale ad un numero pari od impari di semionde, l'intersezione *p* sarà occupata da una frangia oscura o lucida. Nello stesso modo si darà ragione delle frange laterali.

Fenomeni dei reticoli.

362. Sopra una lamina di cristallo a facce parallele tirando con una punta di diamante dei righi così ravvicinati da farne entrare almeno una trentina nella larghezza di un millimetro, avremo un *reticolo* di linee opache e trasparenti, le prime nei solchi fatti dal diamante, le seconde negli spazii rimasti liberi.

Applicando uno di questi reticoli all'obbiettivo di un cannocchiale diretto ad una stretta fenditura verticale, che dia accesso alla luce solare nell'interno di una camera oscura, osserveremo nel campo dell'istrumento un'immagine simile a quella che ci presenta la fig. 372. Vedremo in *a* un'immagine bianca e nettamente contornata dell'apertura, come se la luce non soffrisse verun alterazione dal reticolo che attraversa. Lateralmente all'immagine *a* si vedranno in *b* due spazii neri; indi verranno i due spettri *c* che volgeranno ad *a* il violetto; a questi seguiranno due altri spazii neri *d*, ed in fine una serie di spettri che tutti avranno il violetto rivolto ad *a*.

Fraunhofer, a cui è dovuta la scoverta di questi fenomeni, ha osservato che negli spettri prossimi all'immagine della fenditura apparivano le stesse righe che si avevano coi migliori prismi, ma che le loro distanze rispettive variavano da uno spettro all'altro secondo una progressione aritmetica, la cui ragione pareggiava il primo termine. E ponendo a pruova reticoli di diversa finezza egli trovava che il deviamento angolare di una riga dal mezzo dell'immagine *a* era inversamente

proporzionale alla somma di un intervallo trasparente e di un opaco.

I fenomeni dei reticoli sono una conseguenza necessaria dell'ipotesi stabilita nel principio di questo Capo, come Babinet fece pel primo osservare. Ed in vero rappresentino *zm* (Fig. 373) la proiezione orizzontale del reticolo, *ko* il pennello luminoso che viene direttamente dalla fenditura, *o* il luogo occupato dall'occhio dell'osservatore; e sieno *ab*, *cd*, *ef*, ec. gl'intervalli opachi, *bc*, *de*, *fg*, ec. i trasparenti. Se i due raggi *co*, *eo* che partono dai punti estremi della retta *ce*, somma di un intervallo opaco e di un trasparente, abbiano una differenza di lunghezza, eguale a quella di un'onda violetta, le due linee *cd* e *de* giacenti sulla superficie dell'onda totale, che giunge piana al reticolo attesa la grande distanza del sole, invierebbero al punto *o* dei raggi che a vicenda si distruggerebbero perchè differenti di una semionda. Ma i raggi inviati da *cd* sono arrestati dall'intervallo opaco indicato dalle medesime lettere; perciò quelli che partono da *de*, risulteranno efficaci, e faranno parte della zona violetta del primo spettro. A misura che due intervalli consecutivi saranno più lontani dalla retta *ko*, maggiore sarà la differenza di cammino dei raggi, che partiti dai punti di quella coppia d'intervalli, convergeranno al punto *o*; quindi se *oe*—*oc* pareggia un'onda violetta, *ol*—*og* potrà essere eguale ad un'onda rossa, indi a due onde violette, poi a due onde rosse, e così di seguito. Dovrà dunque necessariamente apparire una serie di spettri, che tutti presenteranno il violetto verso *ko* ed il rosso al lato opposto.

A ciò si aggiunga che descrivendo col raggio *oc* l'arco *cs*, che per la sua piccolezza può riguardarsi come una linea retta, si avrà dai triangoli simili *oze*, *ces* la proporzione :

$$ez : eo = es : ec.$$

Or se *es* pareggia la lunghezza di un'onda violetta, il primo membro di questa proporzione esprimerà il seno dell'angolo *zoe* che misura il deviamento da *ko* della prima zona violetta, ed *ec* è somma dell'intervallo trasparente *cd* e dell'opaco *de*.

Quindi se poniamo l'angolo $zoe = \beta$, $es = l$ ed $ec = s$, avremo:

$$\text{sen}\,\beta = \frac{l}{s}, \text{ e prossimamente } \beta = \frac{l}{s}.$$

E così la dottrina delle onde conduce alla legge del deviamento β inversamente proporzionale alla somma s di due intervalli consecutivi, legge che Fraunhofer aveva dedotta dalle sue sperienze.

Dai reticoli opachi, che si ottengono tirando solchi sottili ed assai vicini su di una lamina opaca ben levigata, si hanno per luce riflessa fenomeni di colorazione simili ai precedenti. E mercè un reticolo di questa specie la superficie della madreperla produce i suoi colori cangianti, imperocchè Brewster li vide riprodotti dal mastice e dalle leghe fusibili a bassa temperatura, dopo avervi fatta un'impronta colla madreperla.

CAPO OTTAVO.

DOPPIA RIFRAZIONE.

Definizione. 363. Tutti i corpi cristallizzati, che non hanno per forma primitiva il cubo o l'ottaedro regolare, presentano duplicata l'immagine dell'oggetto che si guarda per mezzo di essi. Prendendo ad esempio la calce carbonata romboidale, conosciuta sotto il nome di *spato islandico*, e sulla quale Erasmo Bartolino scopriva nel 1669 il fenomeno della doppia rifrazione, osserviamo la sua forma esser quella di un parallelepipedo con facce a forma di rombo, e che presenta sei angoli solidi acuti e due ottusi, i primi avendo angoli diedri di 74°,55′ ed i secondi di 105°,5′. Il piano *AmBn* (Fig. 374) che passa per lo spigolo *An* di un angolo solido ottuso e divide per metà l'angolo piano opposto *cAc*, si nomina *sezione principale*; e la sua diagonale AB, come quella ch'è egualmente inclinata alle facce del cristallo, dicesi *asse*. E poichè il cristallo mercè la divisione

meccanica può decomporsi in altri minori simili all'intero, così in ogni piano parallelo ad *AmBn* si avrà una sezione principale, ed ogni retta che nel solido vada parallela ad AB sarà un asse.

364. Se ad un piccolo foro scolpito in una parete di camera bnia, e pel quale entrino dei raggi solari, si applichi un cristallo di spato islandico, se ne vedranno emergere due fascetti luminosi; dond'è chiaro che la doppia immagine veduta attraverso il cristallo, risulta dalla divisione di ogni pennello incidente in due pennelli variamente rifratti. Or facendo girare il cristallo sopra sè stesso senza che abbandoni il foro, potremo per quel piccolo tempo riguardare come costante l'incidenza dei raggi solari; quindi per la legge cartesiana i due fascetti luminosi emergenti dovrebbero conservare le loro direzioni, e dipingere sull'opposta parete due immobili cerchietti di luce. Attuando la pruova si troverà che un solo dei due cerchietti rimane immobile, e l'altro gira insieme al cristallo; un solo dunque dei fascetti luminosi, in cui la rifrazione ha divisa la luce incidente, ubbidisce alla legge cartesiana, l'altro se ne sottrae. Quindi è che i raggi del primo fascetto si son distinti coll'aggiunto di *ordinarii* e con quello di *straordinarii* i secondi.

Raggi ordinarii e straordinarii.

365. Evvi purtuttavia un piano d'incidenza nel quale i raggi straordinarii non divergono dal piano normale dei raggi incidenti; e questo piano è quello della sezione principale. Quindi avviene che le due immagini di un punto segnato sopra un foglio di carta alla quale siasi sopraposto un cristallo di spato, appariranno nel piano della sezione principale, quando questo si confonde col piano d'incidenza; mentre in ogni altro caso l'immagine straordinaria ne sta fuori, e la sua distanza giunge al massimo, quando il piano d'incidenza trovasi ad angolo retto con quello della sezione principale. E per la stessa ragione avviene ancora che nella coincidenza di questi due piani le due immagini di una retta si mostrano sopraposte l'una all'altra.

Rifrazione nel piano della sezione principale.

Ma se nel piano della sezione principale è soddisfatta dai

raggi straordinarii la prima parte della legge cartesiana, manca poi la seconda, ossia il rapporto costante tra i seni d'incidenza e rifrazione; imperocchè qualunque sia in quel piano la direzione dei raggi incidenti, si vedrà il pennello straordinario star sempre più vicino dell'altro all'angolo acuto D (Fig. 375) del romboide formato dalla sezione principale. Così quando il pennello incidente va per la normale *nl*, od è a questa inclinato secondo *pl* o secondo *gl*, i rispettivi raggi straordinarii saranno diretti come *ls*, *ls'*, *ls''*, mentre gli ordinarii andranno per *lo*, *lo'*, *lo''*; e perciò se poniamo eguali i due angoli d'incidenza *pln* e *qln*, non saranno eguali, come richiederebbe la seconda parte della legge cartesiana, i due angoli di rifrazione straordinaria *s'lo* ed *s''lo*.

E che il pennello straordinario emerga più vicino all'angolo acuto D che l'ordinario, n'è pruova il seguente fatto. Guardando dal luogo *o* (Fig. 376) e nel piano della sezione principale il punto *m* segnato sull'opposta faccia del cristallo, se ne vedranno l'immagine ordinaria *m'*, e la straordinaria *m''*, che distingueremo agevolmente, stante che la prima apparisce più vicina della seconda. Al contrario del punto *n*, veduto dal luogo *o'*, ci apparirà in *n'* l'immagine ordinaria ed in *n''* la straordinaria. Sono dunque ordinarii i raggi *ms* ed *ns*, e straordinarii *mt* ed *nt*.

Rifrazione in un piano normale all'asse.

366. Tagliando un cristallo di spato con piani paralleli all'asse, potremo ottenere un piano d'incidenza che sia perpendicolare al medesimo asse; ed allora troveremo che la doppia rifrazione operata dal cristallo riuscirà perfettamente conforme alla legge cartesiana, stante che i due pennelli rifratti non solamente giaceranno nel piano d'incidenza, ma soddisferanno ancora alla condizione di un rapporto costante tra i seni d'incidenza e quelli di rifrazione. Quindi è che tagliato dal cristallo un prisma con facce parallele all'asse, si potranno agevolmente determinare gl'indici delle due specie di rifrazione. Così Malus trovò che rispetto allo spato i raggi ordinarii hanno l'indice 1,654295 e gli straordinarii l'indice 1,4833015; e rispetto al cristallo di rocca Biot ebbe 1,547897 per indice

dei raggi ordinarii e 1,557106 pei raggi straordinarii. Dai quali due esempii si rileva che i cristalli birifrangenti debbono distinguersi in due classi; l'una sarà quella dei così detti *cristalli positivi* od *attrattivi*, i quali a simiglianza del cristallo di rocca rifrangono i raggi straordinarii più che gli ordinarii; l'altra si comporrà dei *cristalli negativi* o *ripulsivi*, che al pari dello spato fanno che i raggi straordinarii divergano meno degli ordinarii dalla normale d'incidenza. E da ciò deriva che nei cristalli negativi l'immagine ordinaria sembri più vicina della straordinaria, e che il contrario avvenga nei cristalli positivi.

367. Tagliando un cristallo di calce carbonata con due piani normali all'asse, e facendo che sopra una delle due sezioni cada normalmente un fascetto di raggi luminosi, lo vedremo emergere indiviso dall'altra; e qualunque sia l'inclinazione del fascetto sopra una delle facce del cristallo, sia essa naturale od artificiale, la rifrazione riuscirà semplice ogni volta che i raggi percorreranno il cristallo secondo linee parallele all'asse. Rifrazione secondo l'asse.

Molti cristalli del pari che lo spato non presentano che una sola direzione d'indivisibilità dei raggi rifratti; altri poi, come i cristalli di nitrato di potassa, di zucchero, ec. ne presentano due. Quindi la distinzione di *cristalli ad un asse* da *cristalli a due assi*. E se pei primi la doppia rifrazione dà un fascetto ordinario ed un altro straordinario, pei secondi al contrario i due fascetti rifratti sono amendue straordinarii. La qual cosa è stata dimostrata da Fresnel con un esperimento decisivo. Egli compose un prisma con pezzi tagliati in diverse direzioni da un cristallo a due assi, e vide che l'immagine di una retta guardata attraverso quel prisma, compariva sotto forma di due linee spezzate. Or se uno dei fascetti rifratti avesse seguita la legge cartesiana, il suo cammino sarebbe riuscito indipendente dalla giacitura dell'asse, e l'immagine da esso prodotta avrebbe dovuta apparire rettilinea.

Nei cristalli a due assi vi sono purtuttavia due piani di rifrazione in cui uno dei fascetti luminosi diviene ordinario.

Uno di questi piani è normale alla bisecante l'angolo degli assi, l'altro lo è alla bisecante dell'angolo supplemento del primo. Ed è notevole che i raggi rifratti ordinariamente nel primo piano, lo sono straordinariamente nel secondo, e viceversa.

Prisma di Nicol. Micrometro di Rochon.

368. Le leggi della doppia rifrazione han data origine a due utili strumenti, il *prisma di Nicol* ed il *micrometro di Rochon*.

Il prisma di Nicol consiste in un cristallo di spato, assai più lungo che largo, tagliato (Fig. 379) da un piano che pei vertici degli angoli ottusi più vicini va perpendicolare a quello delle grandi diagonali delle basi, ed indi unito nelle due facce *dh* della sezione mediante un leggiero strato di balsamo del Canadà. Questo balsamo ha un indice di rifrazione maggiore di quello dei raggi straordinarii e minore di quello degli ordinarii; quindi avviene che dei due fascetti, l'ordinario *ns* e lo straordinario *nz*, in cui rimane diviso il fascetto *an* incidente sulla base *bh* del prisma, il primo incontri nello strato *dh* del balsamo un mezzo meno rifrangente del cristallo, ed il secondo un mezzo più rifrangente. Or per la forma appositamente allungata del prisma il fascetto *ns* incontra lo strato di balsamo sotto l'incidenza dell'angolo limite ed in conseguenza n'è riverberato, mentre il fascetto straordinario *nz* si rifrange secondo *zt*, e poi emerge secondo *tv* in direzione parallela ad *an*. Quindi l'osservatore che guardi un oggetto attraverso le due basi del prisma, ne vedrà la sola immagine straordinaria.

Il micrometro poi, che Rochon inventava nel 1777, consiste (Fig. 382) in un parallelepipedo rettangolare di cristallo di rocca, composto da due prismi triangolari, *abc* e *bcd* tagliati in modo dalla massa di un cristallo della detta specie, che abbiano il primo la faccia rettangolare *ac* ed il secondo la faccia triangolare *bcd* perpendicolari all'asse del cristallo. In conseguenza un raggio di luce *ki* che incontri normalmente la faccia *ac* del solido, dovrà (n° 367) continuare indiviso il suo cammino rettilineo fino ad incontrare la faccia di congiunzione *bc* dei due prismi. Ivi si dividerà in due, nell'ordinario *il* che segui-

rà la linea d'incidenza, e nello straordinario *is* che vieppiù si avvicinerà alla normale, essendo il cristallo di rocca positivo (n° 366), e che soddisferà pienamente alla legge cartesiana. Or l'occhio dell'osservatore essendo in *o*, potrà ricevere nel tempo stesso il raggio straordinario *so*, e l'ordinario *go* parallelo a *kl*; quindi dello stesso oggetto vedrà due immagini, l'una ordinaria e l'altra straordinaria tra loro deviate di quanto è l'angolo *gos*.

E di questo angolo di deviamento troveremo facilmente il valore, conoscendo gl'indici di rifrazione dei raggi ordinarii e straordinarii. Imperocchè ponendo $=1$ la velocità della luce nel voto, e chiamando v la velocità dei raggi ordinarii nel prisma *cbd*, v' quella degli straordinarii, n ed n' i rispettivi indici di rifrazione, avremo (n° 183):

$$1:v=n\ ,\ 1:v'=n'\ ;\ \text{quindi}\ \ v:v'=n':n.$$

Ma il rapporto tra il seno dell'incidenza $bik=i$ ed il seno della rifrazione $siz=r$, essendo lo stesso che quello di v a v', sarà:

$$\text{sen}\, i:\text{sen}\, r=n':n\ ;$$

proporzione che ci darà il valore r, essendo l'angolo i eguale all'angolo rifrangente a del prisma *cbd*.

Or menando pel punto di emergenza s la normale nt, si ha l'angolo d'incidenza $isn=lis=i-r$ e l'angolo di deviamento $gos=e=ost$; sarà dunque per la legge cartesiana:

$$\text{sen}\, e:\text{sen}\,(i-r)=n'\ ;$$

e così avremo il valore dell'angolo di deviamento e dopo aver determinato il valore dell'angolo r.

Ciò posto, immaginiamo il doppio prisma situato dentro un cannocchiale tra la lente obbiettiva c (Fig. 383) e l'immagine *mn* prodotta nel suo fuoco, e che mediante un movimento a vite se ne possa fissare la posizione in modo da recare a giusto contatto l'immagine ordinaria *mn* e la straordinaria *ns*. Allora sarà l'angolo $mln=e$, ed $mn=ml\,\text{tg}\,e$; basterà dunque

conoscere l'angolo di deviamento e, e la distanza mt del doppio prisma dal luogo dell'immagine prodotta nel fuoco della lente, per definire il diametro apparente mn dell'oggetto. E poichè questo diametro non può convenientemente esprimersi se non per mezzo dell'arco che sottende e che ha il centro in quello dell'obbiettiva, così la sua misura dovrà essere $\frac{mn}{f}$, f indicando la distanza focale della lente. Perciò ponendo: $\frac{mn}{f}=k$ ed $mt=h$, sarà:

$$k=\frac{h}{f}\operatorname{tg} e=\frac{he}{f},$$

stante che e sarà sempre un angolo abbastanza piccolo per poterlo sostituire alla sua tangente [1].

E fu col micrometro di Rochon che Arago potè misurare il diametro apparente dei pianeti con una precisione fin allora ignota.

Or il diametro apparente di un oggetto essendo ancora dato dal quoziente della sua altezza a per la distanza d in cui trovasi dall'occhio dell'osservatore, avremo ancora:

$$\frac{a}{d}=\frac{he}{f}.$$

Quindi potremo conoscere d quando a sarà data. Così ponendo invece di a l'altezza media del corpo umano, il cannocchiale di Rochon farà conoscere la distanza d di un corpo di armata.

[1] Nell'ipotesi che l'angolo rifrangente a del prisma cbd (Fig. 382) sia di 30°, sarà $e=19',30''$, e quando anche si avesse $a=60°$, sarebbe $e=57',40''$.

CAPO NONO.

POLARIZZAZIONE DELLA LUCE.

369. Soprapposti l'uno all'altro due romboidi di spato islandico, facciamoci a guardare pel loro mezzo un punto segnato sopra un foglio di carta. Se le facce omologhe dei due cristalli son parallele, altrettanto avverrà delle loro sezioni principali, ed allora guardando in una direzione non molto obbliqua alla faccia superiore del doppio romboide, vedremo due immagini del punto, come le avremmo vedute attraverso di un solo cristallo. Avremo soltanto ad osservare una maggior distanza tra le immagini, e di ciò troveremo facilmente la ragione, considerando che l'aumentata spessezza del mezzo rifrangente deve accrescere la distanza dei punti donde emergono i pennelli rifratti. Esperimento di Huygens.

Facciamo poi girare lentamente il romboide superiore sull'inferiore, ed allora accanto alle prime immagini ne vedremo sorgere altre due, l'una straordinaria prossima alla prima ordinaria, e l'altra ordinaria prossima alla prima straordinaria. Le quali nuove immagini, appena visibili sul principio, si vedranno a mano a mano rinforzarsi, mentre le antiche diverranno sempre più deboli; dimodochè riusciranno tutte eguali quando le sezioni principali faranno un angolo di 45°, ed allorchè questo angolo sarà giunto a 90°, le nuove immagini avranno la loro massima energia, e le antiche saranno sparite. Queste a scapito delle altre ricompariranno dopo i 90°; le pareggeranno dinuovo a 135°; ed a 180° in cui le nuove immagini saranno sparite, esse racquisteranno la prima energia. E continuando a far girare il secondo romboide sul primo, si ripeteranno gli stessi fenomeni, vale a dire che si vedranno ancora quattro immagini a 225° e 315°, e due sole 270° e 360°.

La luce dunque attraversando un cristallo birifrangente acquista nuove proprietà. I suoi raggi incontrando un secondo cristallo non più si suddividono e quando le sezioni principali son parallele, e quando sono inclinate ad angolo retto. Nel primo caso i pennelli luminosi percorrono il secondo cristallo colla stessa fase di rifrazione sofferta nell'altro; nel secondo caso la fase è invertita, vale a dire che i raggi ordinarii del primo cristallo divengono straordinarii nel secondo e viceversa.

Spiegazione data da Newton.

370. A dar ragione dei fenomeni di doppia rifrazione Newton immaginò che ogni molecola di luce avesse quattro facce o *poli*, parallele alla sua traiettoria, e delle quali, due tra loro opposte fossero animate da forza attrattiva [1] verso l'angolo acuto del romboide sulla faccia di emergenza, e le altre due egualmente opposte, fossero inerti. Le molecole che entrano nel cristallo presentando all'angolo attraente una delle facce inerti, formeranno i raggi ordinarii, e quelle che gli presenteranno una delle facce attrattive, comporranno i raggi straordinarii. Quindi è che la luce è *polarizzata* per mezzo della doppia rifrazione, in quanto che le sue molecole sono ordinate in due serie, in una delle quali si trovano tutte quelle che presentano all'angolo attraente le facce attive, nell'altra poi quelle che allo stesso angolo presentano le facce inerti.

Or soprapponendo due romboidi l'uno all'altro ed in modo che le loro sezioni principali sieno parallele, le molecole di luce che avranno presentata una delle loro facce inerti o attive all'angolo attraente di un cristallo, si troveranno egualmente ordinate rispetto all'altro, e perciò i raggi che sono stati ordinarii o straordinarii nel primo cristallo, rimarranno gli stessi penetrando nel secondo. Al contrario se le sezioni principali dei due cristalli sieno inclinate ad angolo retto, le molecole che avranno presentata una delle facce inerti all'angolo attraente di un cristallo, dovranno presentare una delle facce attive all'angolo omonimo dell'altro cristallo, e viceversa;

[1] Newton non conosceva i cristalli positivi.

in conseguenza i raggi che saranno stati ordinarii nel primo, diverranno straordinarii nel secondo, e gli omonimi a questi nel primo cristallo, dovranno rinfrangersi ordinariamente nel secondo.

371. Nel 1809 Malus, facendosi un giorno a guardare attraverso un cristallo di spato islandico i vetri del palazzo del Luxembourg in Parigi, illuminati dal sole cadente, vide con sorpresa che l'immagine straordinaria spariva in due posizioni opposte del cristallo, e che in altre due lontane dalle prime di 90° spariva in vece l'immagine ordinaria. La prima idea che si offrì al suo pensiero fu quella di attribuire il fenomeno ad una doppia rifrazione effettuita dall'aria; ma cercando poi riprodurre con esperimenti diretti ciò che per azzardo aveva scoperto, si avvide che alla produzione del fenomeno era indispensabile un definito valore per l'angolo d'incidenza sul vetro. E così Malus scopriva che la riflessione può rendere *polarizzata* la luce egualmente che la doppia rifrazione. Esperimenti di Malus.

Continuando le sue ricerche Malus trovò—1° Che la luce vuol esser riverberata dal vetro sotto l'incidenza di 54°, 35′ affinchè in certe posizioni potesse attraversare indivisa un romboide di spato islandico— 2°. Che queste posizioni consistono nell'essere la sezione principale del cristallo parallela o perpendicolare al piano d'incidenza sul vetro. Nella prima posizione la luce si rifrange tutta ordinariamente, nella seconda la rifrazione è tutta straordinaria. Nelle posizioni intermedie vi è quantità più o meno grande di raggi ordinarii o straordinarii, secondo che la sezione principale si avvicina ad essere parallela o perpendicolare al piano d'incidenza sul vetro.

La luce dunque riflessa dal vetro sotto l'incidenza di 54°, 35′ si comporta rispetto ad un cristallo di spato non altrimenti che farebbe il pennello ordinario (n° 369) emergente da un simile cristallo.

372. Malus invertendo le sue prime sperienze, fece incontrare da una lastra di vetro e sotto l'incidenza di 54°, 35′ ora il fascetto ordinario ed ora il fascetto straordinario, emergenti da un cristallo di spato. E così vide che i raggi ordina- Proprietà speculare della luce polarizzata.

rii sono riflessi quando il piano d'incidenza è parallelo alla sezione principale, e sono invece assorbiti, quando quel piano è a questa perpendicolare; al contrario i raggi straordinarii sono assorbiti nella prima posizione del piano d'incidenza e riflessi nella seconda.

Dal che risultava che un fascetto luminoso, riflesso da un vetro sotto l'incidenza di 54°,35', dovesse nell'incontrare un secondo vetro sotto la stessa incidenza venirne interamente riflesso od assorbito, secondo che il piano della seconda incidenza si trovi parallelo o perpendicolare a quello della prima. E Malus rifermò questa illazione con appositi sperimenti.

Criterii di polarizzazione

373. Laonde si dirà *polarizzato* un raggio di luce, e quando si rifrange indiviso in un cristallo birifrangente, e quando non è riflesso dal vetro sotto l'incidenza di 54°,35'.

A questi due criterii ne va aggiunto un terzo, e per la cui intelligenza fa d'uopo premettere che il piano d'incidenza sul vetro, in cui la luce acquista le due summentovate proprietà, appellasi *piano di polarizzazione*; e perciò il raggio ordinario che acquista le stesse proprietà nel piano della sezione principale, ha in questa il suo piano di polarizzazione, ed il raggio straordinario che le possiede in un piano perpendicolare a quella sezione, ha nello stesso piano quello della sua polarizzazione.

Or le lamine tagliate dai cristalli di tormalina parallelamente all'asse, hanno la proprietà di essere trasparenti od opache pei raggi polarizzati, secondo che il piano di polarizzazione è perpendicolare o parallelo all'asse del cristallo. Basterà dunque ricevere perpendicolarmente sopra una lamina di questa fatta un pennello luminoso, e lentamente girarla nel suo piano; se la vedremo trasparente in una posizione, ed opaca dopo un quarto di giro, saremo certi che il pennello incidente sia polarizzato.

Apparecchio di Noremberg.

374. Un apparecchio acconcio a poter agevolmente riprodurre ed osservare i fenomeni di polarizzazione è appunto quello ideato da Noremberg. Nella forma più semplice si compone di una solida base AB (Fig. 386), sulla quale s'innalzano

a perpendicolo due colonnette che sostengono il telaio CD, mobile intorno ad un asse orizzontale: sulla base giace lo specchio piano *mn*, e nel telaio sta incastrata una lastra piana di cristallo. La quale essendo inclinata di 35°,25' al piano delle due colonnette, rifletterà secondo la perpendicolare *bc* al piano dello specchio ogni raggio *ab* che la incontri sotto l'incidenza di 54°,35' e che in conseguenza sia polarizzato. Questo raggio sarà riverberato da *mn* secondo *cb*; ed in questa direzione attraversando la lastra CD moverà all'incontro dello specchio P di vetro nero, il quale è sorretto da due colonnette impiantate sopra un anello, mobile concentricamente al cerchio graduato GH. Lo zero di questo cerchio è nel piano di polarizzazione *abc*, e l'anello che vi scorre dentro ha sull'orlo esterno un segno, che cade sullo zero di GH quando il piano *abc* si confonde con quel d'incidenza del raggio *cb* sullo specchio P; quindi è che questi due piani staranno tra loro ad angolo retto, quando il segno dell'anello cadrà sul numero 90° del cerchio graduato. Or se lo specchio P sia inclinato di 35°, 25' sul raggio *cb*, l'osservatore vedrà ivi riflessa l'immagine del foro dell'anello quando il piano d'incidenza sullo specchio si confonderà con quello di polarizzazione, e viceversa il campo apparirà oscuro se i due piani sieno ad angolo retto.

Oltre al cerchio GH evvi ancora l'altro EF similmente graduato, e che al pari del primo porta un anello mobile provvisto d'indice, il quale anello chiuso da un vetro piano serve di sostegno ai corpi che si vogliono porre sul cammino dei raggi polarizzati.

375. Il vetro non è il solo corpo che polarizzi la luce per mezzo di riflessione. Malus trovò la stessa proprietà in tutte le superficie speculari meno che in quelle dei metalli, ma che l'angolo d'incidenza necessario a produrla, ossia l'*angolo di polarizzazione*, è diverso da una sostanza all'altra. E più tardi Brewster discutendo la serie degli sperimenti all' uopo eseguiti, trovò l'importante relazione che, chiamando *p* l'angolo di polarizzazione della sostanza ed *n* il suo indice di rifrazione, si ha: Angolo di polarizzazione.

$$\operatorname{tg} p = n.$$

Ma $\quad tg\,p=\frac{\operatorname{sen} p}{\cos p}$, ed $n=\frac{\operatorname{sen} p}{\operatorname{sen} r}$;

dunque $\cos p = \operatorname{sen} r$, ed in conseguenza $p+r=90°$. Ma $p=kin$; (Fig. 385); dunque $r+kin=90°$; e così la legge di Brewster può ancora enunciarsi dicendo che: *angolo di polarizzazione di una data sostanza è quello che rende il raggio riflesso perpendicolare al raggio rifratto.*

Legge di Malus. 376. Se un pennello di luce incontri una superficie speculare sotto l'angolo di polarizzazione, e da essa riflesso vada ad incontrarne una seconda sotto un angolo consimile, ne verrà riverberato in quantità più o meno grande a norma dell'angolo che faranno tra loro i due piani di riflessione. Questa dipendenza Malus suppose che consistesse in una proporzionalità al quadrato del coseno d'inclinazione dei due piani; la qual cosa fu poi trovata reale da Arago, ed infine dedotta da considerazioni teoriche per opera di Fresnel.

Ma se la luce incidente sulla seconda superficie non fosse stata polarizzata dalla prima, la quantità ottenuta dal secondo rimbalzo sarebbe riuscita indipendente dall'angolo dei due piani di riflessione. Or questo dato sperimentale si trova essere una conseguenza dell'ipotesi che stabilisce ogni fascetto di luce *naturale*, ossia di luce non polarizzata, risultare da due pennelli i cui piani di polarizzazione siano tra loro inclinati ad angolo retto. Ed in vero chiamiamo I la quantità di luce naturale riflessa dalla seconda superficie ed α l'angolo dei due piani di riflessione, e poniamo che uno dei due piani di polarizzazione del fascetto di luce naturale faccia col piano della 2ª incidenza lo stesso angolo α che vi forma quello della 1ª, il piano di polarizzazione dell'altro pennello componente quel fascetto dovrà fare collo stesso piano della 2ª incidenza l'angolo $90°-\alpha$; quindi se del 1° pennello si rifletterà $I\cos^2\alpha$, del 2° se ne rifletterà $I\cos^2(90°-\alpha)=I\operatorname{sen}^2\alpha$. In conseguenza la quantità di luce riflessa della 2ª superficie sarà:

$$I\cos^2\alpha+I\operatorname{sen}^2\alpha=I,$$

vale a dire indipendente dall'angolo α dei due piani di riflessione.

377. Un pennello di luce polarizzata, riflesso sotto un angolo diverso da quello di polarizzazione, rimane tuttavia polarizzato ma in un piano meno inclinato di quel che era al piano d'incidenza. Una 2ª riflessione sotto lo stesso angolo ne lo avvicinerà di più, e così faranno ancora una 3ª riflessione, una 4ª ecc. dimodocchè i due piani giungeranno in ultimo a confondersi insieme. Influenza delle riflessioni e rifrazioni ripetute.

Comparando questo fatto al principio che stabilisce la luce naturale comporsi di egual numero di raggi polarizzati in due piani ad angolo retto, si comprende come avvenga che per mezzo di ripetute riflessioni, sotto un angolo diverso da quello di polarizzazione, la luce naturale pervenga ad interamente polarizzarsi. Imperocchè le ripetute riflessioni avvicinando sempre i piani primitivi di polarizzazione a quello d'incidenza, pervengono in ultimo a confonderli in un solo.

La rifrazione agisce ancora rimovendo il piano di polarizzazione, ma in vece di avvicinarlo al piano d'incidenza, vieppiù ne lo allontana; quindi è che ripetendosi un certo numero di volte fa che infine i due piani si trovino tra loro ad angolo retto. Così avviene che un pennello di luce naturale cadendo sotto l'inclinazione di 35°,25′ sopra una *pila di lamine di vetro*, ossia sopra un sistema di lamine parallele di questa sostanza, allontana continuamente l'uno dall'altro i suoi primitivi piani di polarizzazione fino a metterli per dritto, ed allora emerge interamente polarizzato in un piano perpendicolare a quello d'incidenza.

Or se la riflessione speculare polarizza la luce nel piano di incidenza, e la rifrazione fa altrettanto in un piano perpendicolare al primo, ne segue che i raggi luminosi riverberati dalla superficie del mare e quelli che n'emergeranno riflessi dal fondo, dovranno trovarsi polarizzati in piani giacenti ad angolo retto; e perciò, intercettandone il cammino con una lamina di tormalina tagliata parallelamente all'asse del cristallo, questa diverrà opaca pei primi o pei secondi raggi, a

norma che l'asse sarà parallelo o perpendicolare al piano d'incidenza. Quindi è che la tormalina può esser utilmente adoperata a sottrarre l'occhio dall'azione viva della luce riverberata dalla superficie del mare, e renderlo in conseguenza più sensibile a quella che n'emerge; e così i naviganti potranno più agevolmente scorgere i bassi fondi e gli scogli sottomarini.

Idea della polarizzazione nel sistema delle onde.

378. Conosciamo (n° 370) che nel sistema dell'emissione la polarizzazione della luce non è che un ordinamento delle molecole luminose per faccette dotate di speciale attività; passiamo ora a definire il concetto che dovremo averne nel sistema delle onde.

A tal uopo immaginiamo che un raggio di luce incontri normalmente in un punto o (Fig. 378) la superficie di separazione di due mezzi, la quale supponiamo giacente nel piano stesso della figura; che nel mezzo d'incidenza le vibrazioni normali ai raggi siano tutte comprese in un piano, che tagli la superficie di separazione secondo *ab*; e che in fine le stesse vibrazioni nel secondo mezzo ancora debbano trovarsi ordinate in un piano, inclinato al primo sotto l'angolo *aoc*. Ponendo che nel mezzo d'incidenza la semioscillazione normale al raggio sia rappresentata da *om*, avremo per la legge di composizione dei moti (n° 21) la sua componente *os* secondo *cd*, menando a questa linea la perpendicolare *ms*. In conseguenza, stando all'ipotesi stabilita, l'energia lucida nel trasmettersi dal primo mezzo nel secondo dovrà variare proporzionatamente al coseno dell'angolo *aoc*; si trasmetterà dunque inalterata quando sia $aoc = 0°$, e rimarrà spenta nell'ipotesi di $aoc = 90°$.

Or a queste considerazioni teoretiche compariamo il fatto (n° 373) che le lamine di tormalina, tagliate parallelamente all'asse del cristallo, riescono trasparenti od opache pei raggi polarizzati, secondo che il piano di polarizzazione è perpendicolare o parallelo al medesimo asse; e vedremo derivarne due importanti conseguenze — 1ª Che le vibrazioni trasverse di un raggio polarizzato debbono compiersi tutte in un medesimo piano — 2ª Che tali ancora debbono essere quelle dei raggi che possono attraversare una lamina di tormalina pa-

rallela al suo asse cristallografico, e che questo deve avere una certa ragione di sito col piano di quelle vibrazioni.

A definire questa ragione di sito, e quindi la relazione del piano di polarizzazione con quello delle vibrazioni normali al raggio polarizzato, giova la conoscenza del seguente fatto scoperto da Noremberg. Rendendo girevole intorno all' asse cristallografico *cd* (Fig. 380) la lamina di tormalina *ab* ad esso parallela, e facendola incontrare da un raggio *st*, polarizzato in un piano perpendicolare a *cd*, si troverà che la trasparenza della lamina per un simile raggio resterà invariata quando dalla posizione *ab*, perpendicolare ad *st*, passerà all'obbliqua *a'b'*; al contrario la sua trasparenza andrà scemando, se fatta mobile intorno alla *gh* (Fig. 381) perpendicolare all'asse cristallografico *cd*, si faccia passare dalla posizione *ab*, perpendicolare allo stesso raggio *st*, ad un'altra comunque obbliqua *a'b'*. La lamina dunque, applicandovi la legge della composizione dei moti, non sarà permeabile che dai raggi le cui vibrazioni trasverse sono parallele al suo asse cristallografico. Quindi si comprende come avvenga che due lamine di tormalina *ab,st* (Fig. 380 bis) tagliate parallele all'asse, e soprapposte l'una all'altra in modo che l'asse vi abbia direzioni parallele, daranno passaggio alla luce naturale egualmente che farebbe una consimile lamina, pari in doppiezza alla somma delle due; mentre se le direzioni dell' asse vi stessero inclinate ad angolo retto (Fig. 381 *bis*), il sistema delle due lamine riuscirebbe perfettamente opaco. Or una lamina di tormalina preparata nel modo anzidetto non è trasparente per un raggio polarizzato se non quando il piano di polarizzazione è perpendicolare al suo asse; dunque:

La polarizzazione della luce, nel sistema delle onde, non è che riduzione delle vibrazioni trasverse a giacer tutte in un piano, perpendicolare a quello di polarizzazione.

Donde poi si rileva, perchè la luce naturale attraversando una lamina di tormalina tagliata parallelamente all'asse, riesca polarizzata in un piano perpendicolare al medesimo asse.

379. È noto (n° 373) che nella doppia rifrazione il raggio Cagione della doppia rifrazione.

ordinario è polarizzato nel piano della sezione principale, ed il raggio straordinario lo è in un piano ad essa perpendicolare. Stando dunque al principio esposto nel n° precedente le vibrazioni trasverse del raggio ordinario dovranno trovarsi in un piano perpendicolare alla sezione principale, e quelle del raggio straordinario nel piano della stessa sezione.

È noto ancora che lavorato un cristallo birifrangente con facce parallele all'asse, e fatto cadere su una di esse un raggio di luce in modo che il piano d'incidenza sia perpendicolare all'asse medesimo, il raggio straordinario al pari dell'ordinario renderà soddisfatta la legge di Cartesio ; vale a dire che allora la celerità della luce nei due raggi sarà indipendente dall' angolo d' incidenza. Or la celerità della luce non potrebbe restare invariata, senza che lo fosse l'elasticità dell'etere che la trasmette; ma le vibrazioni trasverse del raggio ordinario sono perpendicolari al piano della sezione principale, e quelle del raggio straordinario sono ad essa parallele; dunque nei cristalli birifrangenti l'elasticità dell'etere è d'uopo che sia costante in tutte le direzioni perpendicolari o parallele all'asse del cristallo.

È noto in fine che nei cristalli positivi il raggio straordinario è rifratto più che l'ordinario, e che l'opposto avviene nei cristalli negativi; nei primi dunque l'elasticità dell'etere parallelamente all'asse sarà maggiore che in direzione perpendicolare, e nei secondi avverrà l'opposto. In conseguenza la doppia rifrazione non è concepibile nel sistema delle onde, senza supporre che l'elasticità dell'etere in ogni punto di un corpo birifrangente sia diversa nelle varie direzioni da quel punto.

Or la cagione di questa variabilità di forza elastica non può cercarsi altrove che nella diversità della coesione molecolare a norma della direzione che si considera nel corpo birifrangente. E che la coesione vi sia realmente varia, oltre al fatto del clivaggio ne son prova i fenomeni di dilatazione termica presentati (n° 79) dallo spato islandico; e d'altronde un ingegnoso sperimento di Fresnel, che or ci facciamo a narrare, ha messo fuor di dubbio che una stretta dipendenza esista tra la

doppia rifrazione e la varia coesione nel mezzo che la produce. Presi quattro prismi retti *a* di cristallo (Fig. 377) perfettamente eguali e le cui basi siano dei triangoli rettangoli isosceli, si pongano le loro facce ipotenuse l'una accanto all'altra in un medesimo piano ; indi si stringano con forte e sostenuta pressione fatta sulle basi opposte ; si riempino i voti *b* con analoghi prismi più corti, unendone le facce di contatto con mastice liquido; e si completi il parallelepipedo mediante i prismi *c*. Se allora attraverso il sistema dei prismi si guardi ad una linea di mira in distanza, se ne vedranno due immagini. Così il vetro, che di natura non è birifrangente, lo diviene mercè variazione meccanicamente prodotta nella sua coesione molecolare.

380. Dal concetto stesso di polarizzazione nel sistema delle onde risulta che due raggi polarizzati non possono interferire, se non quando i loro piani di polarizzazione son paralleli ; e questa illazione è rifermata dalle seguenti sperienze di Arago e Fresnel. Il primo di questi fisici fece passare per due fenditure parallele, chiuse da pile di lamine, due fascetti di raggi luminosi, abbastanza inclinati sulle facce delle pile perchè ne emergessero compiutamente polarizzati. Quando i piani d'incidenza erano paralleli e con essi quelli di polarizzazione, i raggi emergenti interferivano, non ostante la modificazione patita nell'attraversare le pile; ma se quei piani si allontanavano dall'esser paralleli, la frange si vedevano a poco a poco indebolirsi, e finalmente sparir del tutto, quando quei due piani ed in conseguenza quelli di polarizzazione erano divenuti l'uno all'altro perpendicolari.

Interferenze dei raggi polarizzati.

Dagli esperimenti di Fresnel poi togliamo il seguente. Egli prese una lamina di calce solfata, tagliata parallelamente all'asse e di uniforme doppiezza ; la divise in due, e conservando paralleli gli orli della sezione, ne applicò le parti a due fenditure per le quali penetravano in una camera buia due fascetti di raggi luminosi. Questi emergendo dai due pezzi del cristallo, producevano un sistema di frange, quale l'avrebbero prodotto senza l'interposizione del corpo birifrangente,

imperocchè i raggi ordinarii da un canto e gli straordinarii dall'altro, avendo paralleli i loro piani di polarizzazione, potevano interferire egualmente che se fossero stati raggi di luce naturale. Ma quando una delle lamine si faceva rotare nel suo piano fino a presentare i suoi orli perpendicolari agli orli anonimi dell'altra, allora il primo sistema di frange spariva del tutto trovandosi sostituito da una luce uniforme, e si vedevano sorgere due altri sistemi di frange lateralmente al primo, prodotti evidentemente dai raggi ordinarii di un fascetto e dagli straordinarii dell'altro, che per la rispettiva posizione delle lamine si trovavano di aver paralleli i loro piani di polarizzazione; la qual cosa è poi rifermata dalla stessa giacitura laterale dei nuovi sistemi di frange, stante che i raggi di diverso nome avendo diversa velocità, non potevano trovare punti d'incontro, che corrispondessero ad eguali numeri di vibrazioni, se non fuori del piano di simmetria dei due fascetti luminosi.

E su tal proposito è degno di nota il seguente fatto osservato da Fresnel. Se due pennelli luminosi, i cui piani di polarizzazione si trovano inclinati ad angolo retto, derivano da un fascetto primitivamente polarizzato in un sol piano, la loro interferenza potrà aver luogo quando i loro piani di polarizzazione saranno stati ridotti ad un solo. Ma se la primitiva polarizzazione dei due pennelli sia avvenuta in piani opposti ad angolo retto, l'impossibilità d'interferenza non cesserà di aver luogo, ancorchè i piani di polarizzazione sieno portati a mutuo combaciamento.

Colorazione della luce polarizzata.

381. Sul sostegno EF (Fig. 386) dell'apparecchio di Noremberg pongasi una lamina di quarzo tagliata parallelamente all'asse del cristallo, e la cui doppiezza non raggiunga un mezzo millimetro. Ordinata la sezione principale della lamina parallelamente al piano di polarizzazione dell'apparecchio, si guardi attraverso un prisma birifrangente, sostituito allo specchio P, l'immagine del foro scolpito nel sostegno EF, e pel quale attraversando la lamina passerà la luce polarizzata dal vetro CD e poi rinviata secondo l'asse del foro dallo specchio giacente sulla base AB. Se la sezione principale del prisma

sia parallela o perpendicolare a quella della lamina, si avrà un'immagine bianca, ordinaria nel primo caso e straordinaria nel secondo; ma se le due sezioni sono inclinate ad angolo obbliquo, si vedranno due immagini in parte soprapposte l'una all'altra e che bianche nel segmento ad esse comune, nel resto appariranno colorate da tinte complementari, le quali avranno una vivacità massima, quando le due sezioni saranno inclinate di 45.° e quella del prisma giacerà nel piano di polarizzazione o gli sarà perpendicolare.

Questi fenomeni sono conseguenze delle leggi di doppia rifrazione e di quelle che reggono l'interferenza dei raggi polarizzati. Ed invero, quando la sezione principale della lamina è parallela o perpendicolare a quella del prisma analizzatore ed al piano della prima polarizzazione, la luce dovrà attraversarli indivisa; quindi l'immagine sarà unica, e dovrà riuscire bianca come la luce incidente, imperocchè la rifrazione essendo stata semplice; non ha potuto produrre differenza di velocità e quindi ragione d'interferenza nei raggi del fascetto incidente. Ma quando la sezione principale della lamina sarà divenuta obbliqua al piano di polarizzazione, allora il fascetto incidente dovrà dividersi in due, l'uno ordinario che indichiamo con O, l'altro straordinario e che diciamo S. E questi due fascetti incontrando il prisma analizzatore, la cui sezione principale poniamo che non sia nè parallela nè perpendicolare a quella della lamina, si suddivideranno ancora, il primo in O_1 ed S_1 ed il secondo in O_2 ed S_2. I fascetti O_1 ed O_2 emergeranno dal prisma con velocità diverse e polarizzati in un medesimo piano, perciò potranno tra loro interferire; e lo stesso sarà di S_1 ed S_2. Ma i fascetti O_1 ed S_1, O_2 ed S_2 trovandosi polarizzati in piani ad angolo retto, non potranno interferire, e produrranno colla loro riunione il bianco del segmento comune alle due immagini.

Tutti i cristalli birifrangenti, sieno ad uno o due assi, tagliate in lamine a questi parallele, presentano fenomeni analoghi a quelli del cristallo di rocca. La sottigliezza però della lamina vuol esser varia secondo la natura del cristallo.

E se invece di lamine parallele all'asse, se ne taglino di quelle che sieno perpendicolari al medesimo asse, si avranno nuovi fenomeni di colorazione della luce polarizzata, allorchè i suoi raggi attraversando le lamine in direzioni poco divergenti dall'asse del cristallo, andranno a convergere nell'occhio dell'osservatore. Così avremo dei belli anelli concentrici iridati, se la luce bianca delle nubi, polarizzata da uno specchio di vetro nero, ci faremo a riceverla per mezzo di un tubo, in cui siasi aggiustata una lamina di spato doppia di 4 a 20 millimetri, e che nel fondo superiore sia chiaro da un tamburo mobile che porti incastrata nel suo centro una lamina di tormalina. Allorchè la sezione principale di questo analizzatore sarà parallela al piano di polarizzazione sul vetro, gli anelli si vedranno intersecati da una croce bianca (Fig. 388); lo saranno in vece da una croce nera (Fig. 389) ed avranno tinte complementari di quelle dei primi, quando la sezione principale della tormalina sarà perpendicolare al piano di polarizzazione. Sostituendo alla luce bianca i diversi elementi prismatici, gli anelli alterneranno tra il nero ed il colore dell'elemento adoperato, ed il diametro di essi riuscirà vario dal rosso al violetto; quindi la ragione del loro aspetto iridato, quando son prodotti dalla luce bianca. E per un medesimo elemento prismatico il diametro di ciascun anello risulterà minore come la doppiezza della lamina andrà crescendo, fino a sparir del tutto quando la doppiezza avrà toccato un certo limite.

Un apparecchio con cui si possono agevolmente osservare questi anelli colorati, è la *pinzetta a due tormaline*, rappresentata dalla fig. 390. Si compone di un doppio filo metallico, piegato come indica la figura, e che finisce in due anelli destinati a ricevere due dischi mobili intorno ai loro assi e che portano incastrate nei loro centri le due tormaline. Premendo l'una contro l'altra le due branche del filo, la pinzetta verrà aperta e darà agio a potervi introdurre la lamina birifrangente già fermata in un pezzetto di sughero.

Se i cristalli ad un asse danno un sistema di anelli concentrici al medesimo asse, quelli che ne han due produrranno

un egual numero di sistemi annulari, quando sieno ridotti a lamine perpendicolari alla bisecante l'angolo degli assi. Se l'angolo degli assi è abbastanza piccolo, i due sistemi di anelli potranno esser veduti nel tempo stesso; in contrario farà d'uopo osservarli l'un dopo l'altro.

Il doppio sistema annulare non solamente costituisce un carattere distintivo dei cristalli a due assi, ma offre eziandio un mezzo di determinare l'angolo degli assi. Alla qual cosa soddisfa pienamente un apparecchio ideato da Soleil e che vedesi rappresentato nella fig. 391. Si compone dello specchio *a* che polarizza la luce, che viene poi concentrata sulla lamina birifrangente dalla lente *b*; l'altra *d* produce in *c* un'immagine del diaframma pel quale i raggi polarizzati sono immessi nell'apparecchio, e quell'immagine, ingrandita dalla lente *f*, è veduta attraverso la tormalina *g*. La pinzetta che sostiene la lamina birifrangente è mobile su di un cerchio graduato, pel cui mezzo si misura l'angolo degli assi.

È degno di nota che i centri dei due sistemi annulari non conservano una stessa distanza, quando la lamina birifrangente è illuminata da diversi elementi prismatici. Ciò importa che il cristallo debba avere degli assi ottici diversi a norma degli elementi lucidi; ed Herschell, cui va dovuta la scoperta di questo fatto, trovò che nel tártrato di potassa l'angolo degli assi è di 56° pei raggi violetti e di 76° pei rossi, e che nel nitro al contrario l'angolo degli assi va crescendo dal rosso al violetto. Altri cristalli, come quelli di borace per esempio, fanno variare di sito anche il piano degli assi, stante che i loro poli si veggono scorrere su due rette parallele, quando varia l'elemento prismatico che li attraversa.

E si avranno ancora più variati effetti di colorazione, qualora la luce polarizzata si faccia passare per due lamine birifrangenti, l'una all'altra soprapposte. Così facendo con due lamine di mica ed in modo che i piani dei loro assi risultino rettangolari, si avranno due sistemi di curve e quattro poli, come si vede nella fig. 392. Su consimili fenomeni prodotti dalle lamine di quarzo poggia la costruzione del polariscopio

di Salvart, uno degli strumenti più sensibili di questa specie.

Dipendenza dei fenomeni precedenti dall'ordinamento molecolare dei corpi.

382. Nel n° 379 abbiamo veduto che una relazione esiste tra i fenomeni di doppia rifrazione e l'ordinamento molecolare dei corpi birifrangenti. Or questi corpi stessi producono la colorazione della luce polarizzata ; vi dev'esser dunque una relazione tra questi fenomeni cromatici e la fisica costituzione di essi corpi. Ed in vero:

— 1° Se curviamo mercè lo strettoio rappresentato dalla fig. 387 una lunga e stretta lamina di vetro, ed in tale stato si faccia attraversare da luce bianca polarizzata, i raggi da essa emergenti, ricevuti per mezzo di una tormalina, ci mostreranno la lamina ornata di zone colorate parallele alla sua lunghezza, e tanto più numerose e brillanti, per quanto la compressione sarà stata più forte: Brewster ha osservato un fenomeno consimile nella gelatina animale compressa tra due vetri.

— 2° Se dopo aver riscaldata nell'olio bollente una lamina circolare di vetro, la si ponga in un anello metallico a fine di raffreddarne celeramente la circonferenza, ed allora si faccia attraversare da luce bianca polarizzata, questa presenterà per mezzo di una lamina di tormalina una serie di anelli colorati, tagliati da una croce che sarà bianca o nera secondo la diversa posizione della tormalina. Come la lamina andrà raffreddandosi gli anelli diverranno meno visibili, e spariranno del tutto quando il raffreddamento sarà divenuto uniforme. Una lamina rettangolare di vetro, messa di taglio sopra un ferro rovente, e veduta per mezzo di luce bianca polarizzata presenterebbe delle zone iridate.

— 3° Delle doppie lamine di vetro che siano state temperate agitandole vivamente nell'aria dopo averle fortemente riscaldate acquistano un'attività permanente di dar vivi colori alla luce polarizzata.

È però notevole che la colorazione prodotta con questi mezzi artificiali sia dipendente dalla forma della lamina, mentre nulla di ciò si osserva in quelle tolte dai cristalli birifrangenti. Di che avremo una sufficiente ragione conside-

rando che quell'ordinamento molecolare prodotto dai mezzi artificiali in tutta l'estensione della lamina, trovasi attuato in ogni punto della massa di un cristallo birifrangente.

383. Allorchè un pennello di luce polarizzata incontra normalmente una lamina birifrangente, tolta da un cristallo con sezioni perpendicolari all'asse, n'emerge collo stesso piano di polarizzazione che aveva nell'incidenza. A questa regola fanno eccezione le lamine di quarzo, imperocchè alcune di esse fanno girare il piano di polarizzazione a destra, altre a sinistra, e perciò le prime si dicono *destro-gire*, le seconde *levo-gire*. Polarizzazione circolare.

Il quarzo è l'unico solido dotato di questa proprietà; la quale, dopo che Arago l'ebbe scoperta, fu trovata da Biot in diversi liquidi e vapori. Questi fluidi la conservano inalterata, quando si uniscono ad altri che ne son privi; ma se l'unione ha luogo tra sostanze attive, l'effetto pareggerà la somma o la differenza delle rotazioni singolarmente prodotte, secondo che esse saranno cospiranti od opposte.

Il quarzo si distingue ancora per esser la sola sostanza attiva che riesca or destrogira ed or levogira, secondo che la lamina in esperimento sia tolta da questo o da quel cristallo. Una tale mutabilità di azione rimase inesplicata, finchè Herschel non ne avesse dimostrata la dipendenza dall'ordinamento molecolare del cristallo. È noto che la sua forma è quella di un prisma esagonale sormontato da una piramide a sei facce; ed una varietà, detta *plagiedrale*, porta delle faccette nei vertici degli angoli triedri che uniscono il prisma alla piramide. Queste faccette stanno tutte inclinate da un medesimo lato, e secondo che lo sono a destra od a sinistra, la lamina riuscirà destrogira o levogira.

La grandezza della rotazione prodotta da una data sostanza, dipende dalla sua natura, dalla doppiezza della lamina e dalla natura dell'elemento prismatico. La doppiezza influisce in ragion diretta del suo valore; e quanto alla diversità dell'elemento prismatico, l'esperienza ha mostrato che la rotazione è più grande pei raggi che sono più rifrangibili.

Rotazione per magnetismo. 384. Se il quarzo e diversi fluidi in conseguenza della loro molecolare costituzione hanno la potenza di far girare il piano di polarizzazione ai raggi polarizzati, che sotto certe condizioni corrono pel loro mezzo, le forze elettro-magnetiche possono eccitare un'eguale attività in parecchie sostanze che per loro stesse non ne sono provvedute. Tra i molti corpi, in cui Faraday ha scoperto questo nuovo modo di far girare il piano di polarizzazione e che perciò ha denominati *diamagnetici* (n° 257), prendiamo ad esempio il vetro pesante, o silico-borato di piombo. Per due facce opposte di un parallelepipedo di questa sostanza, e parallelamente alla congiungente i poli di un vigoroso elettromagnete, si faccia passare un raggio polarizzato, e nell'emergere dal parallelepipedo si accolga su di un prisma di Nicol disposto in modo da produrre oscurità quando l'elettromagnete è nello stato di riposo. Allora s' immetta la corrente elettrica nelle spire della calamita, e nel medesimo istante si vedrà la luce apparire attraverso l' analizzatore. Introducendo un reotomo nel circuito elettrico l'osservatore vedrà la luce ecclissarsi ad ogni sosta della corrente.

Questo fenomeno è prodotto da rotazione del piano di polarizzazione della luce, imperocchè basta girare l'analizzatore di alquanti gradi perchè la luce si ecclissi durando tuttavia l'azione delle forze elettromagnetiche. La direzione di moto nel piano di polarizzazione è sempre quella della corrente elettrica; e la quantità della rotazione, oltre alla parte dovuta alla speciale natura del mezzo rifrangente, cresce in ragione del magnetismo eccitato nell'elettrocalamita e della doppiezza della lamina messa a cimento.

Azione dei cristalli colorati. 385. Babinet ha osservato che i cristalli birifrangenti colorati assorbono in preferenza i raggi ordinarii o gli straordinarii, secondo che sono negativi o positivi (n° 366). Così la tormalina, che appartiene alla classe dei cristalli negativi, quando è abbastanza colorata e doppia, non lascia passare che i soli raggi straordinarii, e perciò viene adoperata come mezzo analizzatore della luce polarizzata. Al contrario il cristallo di rocca, il quale è positivo, assorbe meglio i raggi straordinarii che

gli ordinarii, e non lascia passare che questi ultimi, quando la sua trasparenza è assai debole.

CAPO DECIMO.

DEI COLORI.

386. Esponendo successivamente un corpo bianco ai diversi elementi dello spettro solare, noi lo vedremo apparir rosso sotto l'azione dei raggi rossi, arancio quando sarà colpito dai raggi omonimi, e così di seguito. Dunque il colore sotto cui un corpo si presenta, è precisamente quello della luce da esso inviataci. Or questa luce, quando ci viene dai corpi opachi bianchi o per mezzo dei corpi trasparenti incolori, presenta gli stessi elementi della luce incidente e nella stessa ragione di quantità, mentre i corpi colorati, sia nella riverberazione se opachi, sia nella trasmissione se diafani, assorbono alcuni elementi lucidi in maggior quantità degli altri. Guardando attraverso un prisma tanto i corpi bianchi che quelli diversamente colorati, ci convinceremo della verità di queste proposizioni. Origine dei colori.

E da ciò poi deriva che i corpi, i cui colori meglio rassembrano a quelli di alcuni elementi dello spettro, ci appariscono oscuri quando sono illuminati da uno o più degli altri elementi. Così la ceralacca comparisce fosca sotto l'azione dei raggi verdi, ed un vetro che lasciasse passare i soli raggi gialli dello spettro, diverrebbe opaco per ogni altro elemento lucido.

387. Un foro scolpito su di un muro che chiude uno spazio buio, apparisce di un perfetto nero a chi lo guardi dall'esterno. Or da quel foro verun raggio di luce può venire all'occhio dell'osservatore; dunque quel nero non è che assoluta privazione d'impressione visiva. Quindi se si dessero corpi di un simile nero, verun punto della loro superficie sarebbe discernibile dall'altro, non potendosi vedere di essi che il solo spazio che Che cosa è il nero.

ne chiuderebbe il contorno apparente. Ciò non si verifica nei corpi riconosciuti per neri ; dunque una qualche luce parte dalla loro superficie. E quella leggiera iridazione che vi si osserva, quando son visti attraverso di un prisma, dimostra che la poca luce da essi inviata è indecomposta egualmente che quella riverberata dai corpi bianchi. Questi dunque differiscono dai corpi neri per sola ragione di quantità tra la luce incidente e la riverberata; imperocchè i corpi bianchi rinviano la massima parte della luce incidente senza decomporla, ed i neri lasciandola ancora indecomposta l'assorbono presso che tutta.

Ai raggi propri dei corpi colorati è sempre mista la luce bianca.

388. Nè soltanto dai corpi bianchi o neri, ma da quelli eziandio diversamente colorati si hanno raggi di luce bianca ed in quantità crescente col grado di levigatezza della superficie. Quindi è che il pittore volendo ritrarre un oggetto forbito e lucente, da prima spande sulla figura già disegnata una tinta simile al colore del corpo, indi con forti tratti di bianco copre i punti da cui la luce specularmente riflessa può giungere all'occhio dell'osservatore, e pone viceversa del nero su quei punti donde i raggi non possono venire. E per gli oggetti stessi, la cui superficie è scabra, non avvi altro mezzo di farne rilevare le parti salienti, che quello di aggiungere del bianco al colore ch'è proprio dell'oggetto. Come d'altronde la pratica di presentare inclinati verso l'osservatore i dipinti specialmente ad olio, serve a liberare l'occhio dai raggi bianchi specularmente riflessi dalla superficie del dipinto, e che se non fossero lanciati verso il suolo dall' inclinazione della tela, scemerebbero di molto l'effetto dei colori che vi ha messi il pennello.

Or questi raggi bianchi misti agli elementi prismatici riverberati da un corpo, fanno sì che il suo colore ci apparisca diverso da quello che realmente è; ed in conseguenza il vero colore di un corpo si avrà quando la luce incidente sarà tutta decomposta nella riverberazione. Or se una prima incidenza è stata sufficiente a decomporre la maggior parte della luce incontrata dal corpo, egli è chiaro che basterà ripetere le incidenze perchè dei raggi bianchi più non esistano nella luce riverberata. Que-

sto ingegnoso spediente per ottenere il vero colore di un corpo fu escogitato dal fisico ginevrino Benedetto Prevost, che lo attuava nel seguente modo. Egli prendeva due lamine della sostanza su cui voleva sperimentare, e dopo averle forbite abbastanza, perchè l'una potesse riverberare l'immagine dell'altra, le poneva tra loro parallele; indi faceva che una viva luce avesse colpita la faccia interna di una lamina, e situava l'occhio in modo che i raggi di quella luce non potessero colpirlo se non dopo aver sofferto parecchie riflessioni tra le due lamine. Così egli trovava che il color giallo citrino dell'oro si trasforma in un arancio assai carico; quello del rame si approssima allo scarlatto; l'argento prende una tinta giallastra di bronzo, e che si trasforma in un bel giallo quando il metallo possiede tutto il suo splendore; lo stagno e la latta prendono l'ordinario colore dell'ottone, e questo metallo si tinge di un giallo più carico di quello che si attribuisce all'oro; l'acciaio in fine prende il colore del bronzo. In un fatto consimile Prevost giustamente trovava la cagione per cui un cilindro di rame mostra nell' interno un colore più carico che all'esterno, ed il velluto per una medesima tinta prende sempre un colore più carico di qualunque altro tessuto.

389. Nel sistema dell'emissione la luce è materia esclusivamente posseduta dalle sorgenti luminose; in conseguenza i raggi che ci vengono dai corpi che non hanno luce propria, non possono essere che rimbalzati dalle loro superficie. Quindi allorchè diciamo che i corpi bianchi rinviano secondo una stessa ragione tutti gli elementi prismatici della luce incidente, e che i corpi colorati ne assorbono alcuni elementi in maggior quantità che gli altri; questa proposizione non è necessariamente vera che nel solo sistema dell'emissione.

I colori obbiettivamente considerati nei due sistemi dell'emissione e delle onde.

Nel sistema poi delle onde la luce non essendo che moto di vibrazione eccitato nell'etere dai corpi luminosi, i fenomeni di colorazione non possono altrimenti chiarirsi che comparandoli a quelli del suono.

Or egli è noto che le onde sonore incontrando un ostacolo al loro moto, ne deviano producendo un centro virtuale di vi-

brazione simmetrico al centro reale (n° 181). Così l'onda riflessa diviene una continuazione dell'onda incidente, e perciò l'eco che ne risulta, conserva inalterato il grado del suono. E simile all' eco è il fenomeno della riverberazione speculare della luce; imperocchè i raggi riflessi formano egualmente un centro virtuale d'irradiazione simmetrico al centro reale, e conservando inalterato il colore della luce incidente mostrano che la lunghezza dell'onda lucida non è variata. Quindi se nell'eco non vi è che deviamento dell'onda sonora, nella riflessione specolare ancora non vi sarà che rimbalzo della luce incidente.

Sappiamo inoltre (n° 200) che le onde sonore, qualora s'imbattono in corpi capaci di vibrare all'unisono, li scuotono a sincroni movimenti, e ne fanno altrettanti centri di vibrazione, da cui nuovi raggi sonori si diffondono per ogni verso senza veruna relazione di sito con quelli delle onde incidenti. E se più suoni diversi percuotessero un corpo, che a somiglianza di un'imperfetta cassa sonora, fosse incapace di rispondere a tutti indistintamente, allora alcuni soltanto dei suoni incidenti sarebbero riprodotti, mentre gli altri rimarrebbero spenti.

Analoga a questo fatto di risonanza è la diffusione lucida operata dai corpi che non hanno superficie specolare. Per essa i raggi anzichè tenere una via determinata rispetto a quelli della luce incidente, vanno come se ogni punto della superficie del corpo fosse centro d'irradiazione. Quindi è che nel sistema delle onde la luce diffusa dalle superficie scabre non è riverberazione della luce incidente, ma è prodotta nell'etere ambiente il corpo mercè vibrazioni indotte nella sua superficie; la quale ci apparirà bianca, diversamente colorata od anche nera, secondo che risponderà a tutte le diverse onde della luce incidente, ad alcune soltanto, ovvero a nessuna. Così i corpi bianchi si comportano rispetto alla luce incidente come le buone casse degli strumenti a corde verso i suoni che le colpiscono; ed i corpi neri, la cui irradiazione lucida è presso che nulla, vanno comparati a quei corpi oltremodo soffici, contro i quali ogni suono si muore.

Questa teoria della diffusione lucida, proposta la prima volta da Eulero, è rifermata da un fatto scoverto pochi anni or sono da Niepce de Saint-Victor. Era noto che sotto l'azione della luce solare, diretta o diffusa, il nitrato di argento rimane decomposto. Or il Niepce ha trovato esservi dei corpi, come la carta bianca, che possono attuare una simile decomposizione nel buio, sol perchè sono stati precedentemente esposti all'azione della luce solare. Come la corda tocca dalla martellina in un pianforte, dura per qualche tempo nella sua vibrazione, così i corpi summentovati conservano la proprietà di scuotere l'etere ambiente dopo esser sottratti dall'azione eccitante della luce; e se la vibrazione della corda non dura che qualche secondo, quella prodotta dalla luce dura un tempo incomparabilmente più grande, stante che la carta bianca parecchi giorni dopo la sua introduzione nel buio conserva tuttavia la efficacia di scomporre il nitrato di argento.

E considerando, in fine, che dalla teoria matematica dei moti vibratorii risulta uua riverberazione, almeno parziale, delle onde incidenti dover avvenire nella superficie di separazione di due mezzi, noi comprenderemo chiaramente perchè agli elementi prismatici inviati dai corpi colorati vadano sempre congiunti dei pennelli di luce bianca. Questa si compone di quei raggi della luce incidente che sono specularmente riflessi dalla superficie del corpo colorato, mentre la luce che ne costituisce il colore proviene dalle vibrazioni trasfuse nei punti della stessa superficie dall'impeto meccanico dei raggi che ivi rimangono spenti.

390. Se i colori obbiettivamente considerati si trovano in perfetto accordo col sistema delle onde, risultati non meno soddisfacenti avremo dalla loro subbiettiva considerazione. **I colori subbiettivamente considerati.**

— 1° *Efficacia del giallo* — Quantunque sia vero che un corpo, qualunque ne sia il colore, ci apparisca sempre colla tinta dell'elemento prismatico che lo colpisce, purtuttavia se il colore dell'elemento è diverso da quello che il corpo diffonderebbe sotto l'azione della luce bianca, non avremo che una tinta fosca; tale è il caso di un corpo verde illuminato dai raggi rossi

dello spettro. Ma se questo corpo venisse illuminato dai raggi verdi, allora lo vedremmo di un colore assai vivo. Questo fatto di colorazione è perfettamente analogo al fatto acustico del campanello di Savart (n° 200), la cui vibrazione da prima debole, diviene intollerabile, quando il tubo, a cui si comunica, giunge all'unisono del campanello.

Or egli è noto che tra tutti gli elementi dello spettro i raggi gialli son quelli che illuminano più vivamente. Quindi se la visione dipende da vibrazioni eccitate nella retina dalle onde luminose, questa membrana dovrà esser gialla anzichè bianca come gli anatomici la descrivono. Ed il Melloni, che pel primo ne traeva questa illazione, fattosi ad osservare attentamente la retina, si avvide che l'insensibilità del suo colore giallo dipende dalla tenuità della membrana; imperocchè ripiegandola sopra sè stessa la si vede manifestamente gialla Egli ha trovato ancora che questo colore decresce coll'età, ma che in compenso aumenta il giallo del cristallino, dimodochè soprapponendo questo alla rispettiva retina, risulta un giallo costante per tutte le età della vita.

— 2° *Daltonismo* — Avvi delle persone, il cui occhio non avverte l'azione di alcuni elementi dello spettro. Quest' anomalia, conosciuta sotto il nome di *daltonismo*, perchè il celebre chimico Dalton n'era affetto, è incomprensibile nel sistema dell'emissione che fa dipendere la visione dall' urto delle molecole luminose.

Stando ai risultamenti ottenuti in questi ultimi tempi da Pole, professore del Genio civile all'Università di Londra, il daltonismo non consisterebbe in altro che nell'insensibilità dell'occhio all'azione dei raggi rossi e verdi. I quali colori appariscono all'occhio del daltonico sotto l'aspetto di una tinta griggia, prodotta dall'azione di quei pochi raggi bianchi che accompagnano quelli del colore proprio del corpo; quindi è che gl'individui affetti da questa malattia non distinguono le ciriege dalle foglie dell'albero che per la sola differenza di forma.

Il Pole cominciò le sue ricerche sopra sè stesso dopo aver

conosciuto di esser daltonico ; indi le estese ad altri individui affetti dallo stesso morbo. Ed i risultamenti, cui pervenne, sono così giusti, ch'egli con semplici mescolanze di giallo e blù ha potuto comporre tutti i colori che i daltonici da lui esaminati potevano distinguere.

— 3° *Irradiazione.* Osservando la luna nel 1° suo quarto, la si vede come un disco di color cinericcio sormontato da un arco luminoso di un diametro più grande ; quella luce cinericcia le viene dai raggi riverberati dalla terra; l'arco splendente è parte della superficie del planeta colpita direttamente dai raggi solari. Così ancora un cilindro metallico, perfettamente forbito, esposto all'azione diretta dei raggi solari, lascia vedere una zona raggiante parallela all'asse del cilindro, mentre per la legge della riflessione speculare anzichè una zona noi dovremmo vedere una sottilissima linea di luce.

Per vedere in che consista la cagione di questo aumento che prende il diametro apparente di un oggetto sotto l'azione di una luce viva, prendiamo due dischi perfettamente eguali, l'un di un colore vivace, l'altro fosco, e poniamo il primo sopra un fondo chiaro, il secondo su di un fondo oscuro: facendoci a guardarli da una certa distanza, il disco più chiaro ci apparirà più grande dell'altro. Or i due elementi, su cui si fonda il giudizio [1] della grandezza di un oggetto, la nozione

[1] L'idea che alla vista di un oggetto, ci formiamo della sua grandezza, non risulta immediatamente dalla sensazione, ma viene da un giudizio che non avvertiamo perchè abituale. Noi crediamo vedere invariata la grandezza di un oggetto, sia che lo guardiamo alla distanza di 4 piedi, sia che lo guardiamo alla distanza di 20 piedi, mentre l'immagine dipinta sulla nostra retina ha nel secondo caso dimensioni cinque volte più piccole che nel primo. E che la cosa vada proprio così, potremo assicurarcene nel modo che segue: si prendano due eguali assicelle di legno, e si pongano verticalmente in modo che le due estremità inferiori siano sopra la nostra visuale. Allora si vedrà l'assicella più lontana mostrare una lunghezza metà, terza parte, ecc. di quella della più vicina, secondo che la prima sarà 2, 3,... volte più lontana della seconda. Per la stessa ragione avviene ancora, che se mentre guardiamo un lontano edifizio, ivi davanti passi un uomo od altro oggetto di conosciuta grandezza, immantinenti quell'edifizio ci apparirà più grande; imperocchè troveremo in quel noto oggetto un termine di paragone per valutare l'effetto della distanza.

cioè della distanza e l'estensione dell'immagine dipinta sul fondo dell'occbio, questi due elementi sono gli stessi pei due dischi, e perciò ci dovrebbero apparire eguali; che anzi il disco più scuro dovrebbe sembrare più grande, appunto perchè meno chiari ci appariscono gli oggetti più lontani. La cagione del fenomeno starà dunque nell'impressione fatta sull'occhio; e se poniamo che la luce non altrimenti agisca sulla retina, che eccitandola a sincrone vibrazioni, comprenderemo che non sia possibile scuoterne intensamente una parte, senza che il moto si comunichi alle molecole contigue. E di ciò si ha bastevole pruova dai seguenti fatti.

a) Ad eguale intensità di luce l'*irradiazione*, ossia l'apparente ingrandimento dell'oggetto, riesce maggiore per gli oggetti più lontani. Or se la comunicazione del moto vibratorio è reale, essa date le altre circostanze eguali dovrà estendersi sempre alla stessa distanza dal contorno dell'immagine; e poichè questa diviene minore come l'oggetto sta più lontano, così la ragione dell'area della zona irradiata a quella dell'immagine dovrà esser crescente colla distanza dell'oggetto.

b) L'irradiazione aumenta colla durata della contemplazione dell'oggetto. Ciò deriva immediatamente dall'ideata trasfusione di moto, imperocchè durando l'azione della luce sopra un punto della retina, maggior numero d'impulsi si trasmette ai punti contigui, e più innanzi si estende la comunicazione del moto.

c) Su di una bianca parete si tiri una linea nera, e sopra un punto che da questa sia lontano di 7 in 8 centimetri si fissi lo sguardo. Non ostante la sua obbliquità la linea sarà visibile nei primi momenti della contemplazione; ma come questa andrà prolungandosi l'immagine della linea diverrà sempre più languida fino a sparir del tutto nel bianco della parete.

d) Avvi nella retina un punto insensibile all'azione della luce, e perciò denominato *punctum coecum* dagli anatomici. Esso giace nell'inserzione del nervo ottico colla retina, e se ne mostra la sua insensibilità per la luce mercè l'esperimento

che segue. Alla reciproca distanza di quasi un piede ed all'altezza dell'occhio si dipingano due cerchietti bianchi sopra un fondo nero ; indi chiuso uno degli occhi, e poniamo il sinistro, si proceda lentamente verso il piano del disegno , tenendo l'occhio destro normalmente al cerchietto che giace a sinistra. Non cesserà pertanto di mostrarsi l'immagine del cerchietto situato a destra , fuorchè in una data posizione dell'occhio, nella quale la si vedrà sparire del tutto : in quell'istante l'immagine del cerchietto destro cade sul punto cieco. Or se l'irradiazione non si diffondesse anche sulla regione di questo punto, guardando una parete bianca dovremmo vedervi un cerchietto nero.

c) Prendasi un pezzo rettangolare di carta , se ne copra la metà di nero , ed ungasi l'altra con l'olio ; e normalmente alla linea di separazione delle due metà vi si faccia una fenditura rettangolare, larga circa 5 millimetri ed egualmente estesa nelle due metà della carta. Così preparata la si ponga tra la luce di una finestra, e l'occhio dell'osservatore , che ne sia lontano di qualche metro, e si vedrà la metà della fenditura compresa nella parte annerita della carta apparire più ampia di quella che giace nella parte traslucida.

L'irradiazione dunque segue la ragione inversa della lucidezza del fondo su cui l'oggetto ci appare proiettato. Nè saprebbe andar diversamente, se consiste in una vibrazione trasfusa , imperocchè il moto potrà tanto meno estendersi dal luogo dell'immagine nelle parti contigue, per quanto più intenso sarà il moto da queste concepito in conseguenza di una azione diretta.

391. Bisogna un tempo perchè le vibrazioni luminose si trasfondano nella retina, ed un tempo ancora perchè si estinguano dopo esservi state trasfuse. A provare la 1ª parte di questa proposizione basta l'invisibilità dei proietti lanciati dalle armi da fuoco ; ed il nastro lucido che ci presenta un tizzo acceso, menato rapidamente in giro , ci chiarisce della seconda. Della quale si ha poi un'ingegnosissima prova nel *disco mirabile* di Plateau , conosciuto ancora sotto i nomi di

Durata dell'impressione lucida.

stroboscopio o *fenachistoscopio*. È un disco verticale intorno ad asse orizzontale; che sopra una delle sue facce porta disegnate le varie posizioni di una figura che rota o di un pendolo che oscilla, e sopra ciascuna di queste posizioni sta scolpito un foro presso la circonferenza del disco. Ordinata questa faccia parallelamente ad uno specchio piano, e data al disco tale celerità di rotazione, che i fori coll'intervallo di circa un $\frac{1}{10}$ di secondo passino l'un dopo l'altro innanzi all'occhio che pel loro mezzo guarda nello specchio, allora l'osservatore crederà guardare costantemente per uno stesso foro, e quel moto, di cui nel disegno non sono rappresentati che alcuni istanti, sembrerà continuo in guisa da farci credere che realmente siavi innanzi allo specchio un oggetto che rota o un pendolo che oscilla.

Colori accidentali o subbiettivi.

392. Se le impressioni lucide fatte sulla retina, durano oltre l'istante in cui sono state prodotte, la loro durata non è purtuttavia la stessa per ogni elemento prismatico, nè per ciascuno di questi elementi la sparizione del moto impresso si effettua con una medesima legge. A queste considerazioni necessariamente si viene ponderando i fenomeni che si osservano nei così detti *colori accidentali* o *subbiettivi*.

Così se fissiamo per qualche tempo lo sguardo sopra una fiamma assai viva e fissa, come quella di una buona lucerna, e poi chiusi gli occhi ci volgiamo verso il lato più oscuro della stanza, continueremo a veder tuttavia l'immagine della fiamma, ma con diverso colore. La vedremo da prima gialla, indi passando per l'arancio ci apparirà rossa, ed in fine toccando il violetto passerà al color azzurro che diverrà sempre più fosco fino a sparire nelle tenebre in cui gli occhi si trovano.

Questi colori che percepiamo dietro l'azione di una luce viva [1] e nell'assenza dell'oggetto che ce la inviava, son quelli che si dicono *colori accidentali* o *subbiettivi*.

[1] Gli sperimenti di questo genere, quando vi si adoperi una luce molto viva, sono di gravissimo pericolo per la vista. Newton in una lettera a Locke scriveva che avendo voluto ripetere l'esperimento indicato nel trattato di Boyle su i colori, di guardare cioè fissamente l'immagine del sole riverbe-

Or la forma, sotto cui si presentano nell'esperimento qui sopra descritto, ci dimostra che al cessar dell'azione lucida il movimento prodotto dai raggi gialli si conserva sulle prime meglio che quello attuato dagli altri elementi prismatici, ma che poi va scemando sì rapidamente da rendersi meno sensibile di quello lasciato dall'azione dei raggi rossi; e questo secondo movimento, che allora predomina sull'altro prodotto dai raggi di color azzurro, non tarda poi a divenirne meno appariscente. Il fatto dunque ci dimostra — 1° Che il moto prodotto nella retina da'raggi gialli, sparisce prima di quello lasciato dai raggi rossi; e questo prima dell'altro attuato dai raggi di color azzurro — 2° Che la sparizione del moto lasciato dai raggi gialli è lenta sul principio, indi rapidissima; mentre quello venutoci dai raggi rossi, e molto più l'altro prodotto dai raggi di color azzurro, si sono scemati rapidamente sul principio, ma poi sono stati lenti ad estinguersi.

E di queste illazioni egli è facile aver la riprova. All'uopo basterà ripetere il succennato sperimento colla differenza che l'occhio, dopo aver ricevuto l'azione lucida della fiamma, anzi che girarsi chiuso verso la parte più oscura dello spazio ambiente, lo si dirigga ad una parete bianca abbastanza illuminata; imperocchè allora si vedrà quivi proiettata un'immagine della fiamma, sulle prime di color azzurro, poi verde, ed in fine di un giallo che facendosi sempre più sbiadito va in ultimo a confondersi col bianco della parete. I colori che l'immagine accidentale assume nel secondo sperimento son dunque complementari di quelli che ha mostrato nel primo.

Or per vedere come questo fatto non sia che una riprova di quelle illazioni, fa d'uopo considerare che l'occhio, come ce

rata da uno specchio, e poi girare lo sguardo verso un fondo scuro, n'ebbe tale reazione nella retina, da vedere di tempo in tempo ricomparire spontaneamente i colori accidentali; e che non giunse altrimenti a liberare l'occhio da questa grave molestia, se non chiudendosi per tre giorni in una stanza perfettamente buia. A tempi nostri Plateau nel Belgio e Fechner in Germania restarono ciechi in conseguenza di continuate ricerche su i colori accidentali. Avventurosamente per Fechner la cecità non è stata che temporanea, avendo potuto ricuperar la vista dopo due anni.

ne chiarisce la molestia che soffre nel passare dal buio alla luce, perde di sensibilità a misura che continua l'azione luminosa. Quindi se l'impressione dei raggi gialli è quella che nel primo sperimento rimane predominante allorchè l'occhio è sottratto all'azione della luce, dovrà viceversa nel secondo riuscir minore di quella che produrranno gli altri elementi prismatici inviati dalla parete bianca. La sensazione sarà dunque quale si avrebbe dal complesso di tutti i raggi meno i gialli, e l'immagine dovrà avere un color azzurro: a questo per la stessa ragione dovrà succedere il verde invece del rosso, e poi il giallo invece dell'azzurro.

Novella pruova ne abbiamo ancora negli effetti nascenti dal contrasto dei colori. È noto che il verde spicca a fianco al rosso, come il giallo accanto all'azzurro; ed in generale di più corpi di diverso colore ciascuno diffonde su quello che gli sta vicino una tinta complementare della sua. Quindi è che nel loro insieme i diversi colori appariranno più o meno armonizzati, secondo che i colori accidentali che l'occhio vi diffonde saranno più o meno analoghi a quelli che realmente posseggono. E di ciò troveremo una sufficiente ragione, se insieme alle cose innanzi esposte ci faremo a considerare che in compagnia dei raggi costituenti il colore di un corpo ne vanno sempre alcuni di luce bianca. I quali, allorchè volgiamo lo sguardo dalla contemplazione di un oggetto verde a quella di un oggetto rosso, non riescono egualmente efficaci nei loro diversi elementi; imperocchè l'occhio stanco per l'azione dei raggi verdi, più non li avverte nei pochi raggi bianchi riverberati dal corpo rosso; sente invece quelli che restano; e poichè questi danno per risultante una tinta rossa, così l'omonimo colore del secondo corpo ne viene rinforzato.

L'esistenza di questi colori accidentali simultanei agli obbiettivi ci rende ragione della mutua influenza tra il colore della pelle e quello della veste che si ha in dosso. Ad una carnagione bruna stanno male tanto il rosso che il giallo, stante che il primo vi diffonde una tinta verde ed il secondo una tinta azzurra che rendono assai brutto il color della pelle: al

contrario una carnagione perfettamente bianca non disarmonizza che col bianco. Per quest' influenza dei calori accidentali il pittore nel ritrarre vuole che si abbia in dosso l'abito che dovrà coprire la persona nel dipinto; e gli architetti decoratori nell' armonizzare i colori delle pareti con quelli dei mobili che debbono ornare le stanze, il tappezziere nella scelta delle stoffe, il fabbricante di tele o carte colorate nella scelta dei disegni, il giardiniere nella disposizione dei fiori nelle aiuole ecc. ecc. troveranno degli utili insegnamenti nello studio dei colori accidentali.

Dicemmo che questi colori hanno ricevuto ancora il nome di *subbiettivi*; e tali realmente sono, imperocchè l' immagine da essi prodotta riesce eguale maggiore o minore di quella dell' oggetto, secondo che il piano su cui si proietta, sta in distanza eguale, maggiore o minore della distanza dell'oggetto. Nel primo caso la regione affetta della retina pareggia in estensione l' immagine prodotta dall' oggetto, n'è più grande nel secondo caso, e minore nel terzo.

CAPO UNDECIMO.

AZIONE CHIMICA DELLA LUCE.

393. La Chimica ha scoverto gran numero di fatti, che dimostrano il potere della luce in comporre e scomporre parecchi corpi. Così un mescuglio di cloro ed idrogeno detona sotto l'azione diretta della luce solare, e produce l'acido idroclorico; l'acido nitrico concentrato lentamente si risolve in gas ossigeno e vapori di acido nitroso; il nitrato di argento depone questo metallo sotto forma di una sottilissima polvere nera; ec. ec. Dagherrotipia e Fotografia.

Or di questa forza dissolvente della luce si è fatta una stupenda applicazione a giorni nostri, prima coll'invenzione della *daguerrotipia*, indi con quella della *fotografia* propriamente detta.

L' annerirsi che fa il nitrato di argento sotto l' azione della luce fu riguardato da Wegdwood come mezzo di poter fissare sopra una carta le immagini che degli oggetti si hanno nella camera oscura ; e Davy ne fece pruova ricevendo sopra una carta bagnata con soluzione dello stesso nitrato le immagini dei piccoli oggetti ingrandite col microscopio solare. Faceva d' uopo pertanto ch' esse fossero custodite nel buio, affinchè quella tinta nera che rappresentava i punti più illuminati dell' oggetto, non ne facesse sparire interamente il disegno, diffondendosi per azione della luce su tutta la superficie della carta.

Non si avevano che queste poche ed insufficienti nozioni intorno alla possibilità di trovare un mezzo fotografico, quando si annunziava la maravigliosa scoperta del Daguerre. — Una lamina di rame vestita da sottilissima foglia di argento viene per qualche tempo esposta ai vapori di iodo, che vi producono una tenuissima falda di joduro di argento, decomponibile dall' azione della luce. Questa lamina iodurata si pone nella camera oscura, giusta nel luogo occupato dall' immagine ed ivi si lascia libera all' azione della luce, che proporzionatamente alla sua intensità ed alla sua durata vi decompone il ioduro di argento. Così l' immagine vi rimane impressa, ma in modo che l' occhio non giunge a vederla ; e per farla sensibile si espone la lamina al vapore di mercurio che sotto forma di esilissimi globetti ed in quantità proporzionale all' eseguita scomposizione del ioduro si depone nei punti colpiti dalla luce. Allora fa d' uopo che il resto del ioduro vada via, e che la lamina torni ad essere specchiante nei luoghi di minima azione della luce ; e ciò si ottiene lavandola con soluzione di sottosolfato di soda. Se allora l' occhio se le ponga siffattamente incontro da ricevere gran copia di luce dalla superficie specchiante dell' argento , non si vedrà che un' immagine *negativa* del campo di visione ritratto nella camera oscura, vale a dire che appariranno chiari i punti ch' erano in ombra,ed oscuri quelli che erano illuminati; ma se invece l'occhio sia situato in modo che le parti speculari della lamina non

possano inviargli che la poca luce proveniente dai luoghi meno illuminati dello spazio ambiente, allora la luce diffusa dai globetti di mercurio renderà sensibile l'immagine *positiva* dell'oggetto, ossia l'immagine che fa vedere le gradazioni di chiaro ed oscuro, come realmente sono distribuite.

La necessità di dover cercare un punto di veduta che facesse nettamente apparire l'immagine dagherriana, e quel suo aspetto metallico che tanto dispiace all' occhio uso a veder ritratte le cose col pennello o colla matita, erano due gravi inconvenienti che l' invenzione del *metodo fotografico*, dovuto a Talbot, ha fatto sparire. Per far comprendere lo spirito di questo metodo , che va sempre più perfezionandosi , basterà dire che una lamina di cristallo coperta di uno strato di materia che la luce può decomporre, è introdotta nella camera oscura per ricevere l' azione lucida dell' immagine che vi è prodotta. Fatta questa prima operazione, il residuo della materia sensibile è portato via, perchè l' immagine negativa rimanesse fissata. Vi si applica una carta imbevuta di materia egualmente sensibile , e pel suo mezzo la lamina si espone a ricevere l' azione della luce solare ; quindi risulteranno oscure le parti corrispondenti alle chiare di quell' immagine, e chiare quelle che si troveranno sottoposte alle oscure. Così si ha l'immagine positiva che sarà fissata nel modo consueto, e se ne potrà ottenere quel numero che si vuole.

394. Non tutti gli elementi luminosi sono egualmente idonei ad eccitare delle azioni chimiche. Il cloro e l' idrogeno , chiusi in vaso di vetro rosso, non si combinano, nè il cloruro di argento vi sarebbe annerito ; al contrario sotto l' azione della luce violetta questi due effetti chimici si compirebbero così celeramente come sotto l' influsso della luce bianca.

Ineguale azione chimica dei varii elementi prismatici.

E per vedere che per siffatte azioni chimiche valgono meglio i raggi che sono più rifrangibili, gioverà che per mezzo di un eliostato sia fermata la direzione di un fascio di raggi solari che per apposito foro si faccia penetrare nell'interno di una camera buia. Fatto quivi incontrare da un prisma, n' emergerà uno spettro che avrà giacitura costante sulla

parete che lo riceve; e così potrà ottenersi che una carta imbevuta di cloruro di argento sia nei singoli punti colpita sempre dai medesimi raggi. Allora si vedrà quella carta presto annerirsi nei luoghi occupati dalle zone comprese tra il verde e l'estremo violetto, mentre rimane inalterata nei luoghi corrispondenti alle altre zone dello spettro.

LIBRO OTTAVO.

COMPLEMENTO DELLA TEORIA DEL CALORE.

CAPO PRIMO.

CONDUZIONE TERMICA.

395. Il calore può moversi nell'interno di un corpo, sia transitando da una falda di molecole all' altra e lasciando in ogni falda i segni della sua presenza, vale a dire un accrescimento di volume e di temperatura; sia correndo, come fa la luce attraverso un corpo diafano, cioè senza passaggio immediato da molecola a molecola e senza accrescere la caloricità del corpo ed il volume. La prima forma di movimento è conosciuta sotto il nome di *conduzione*; l' altra è stata detta *diatermaria* da Melloni. Definizione.

396. Un solfanello acceso si tiene per l'altro estremo senza che le dita provino alcun calore; non si potrebbe fare altrettanto con un eguale cilindretto metallico, senza rimanerne scottato. Il calore dunque nel suo passaggio da molecola a molecola incontra una resistenza che varia colla natura del corpo. Potere conduttore dei solidi. Metodo di Ingenhouz.

Per misurare questa resistenza, nella cui ragione inversa sta il *potere conduttore* di un corpo, Ingenhouz procedeva nel seguente modo. Normalmente ad una delle facce di una piccola cassa rettangolare metallica egli fermava per le loro basi i solidi su cui voleva sperimentare, già ridotti a forma di cilindretti di eguali dimensioni; li copriva di uno strato di cera; indi versava dell' acqua bollente nell' interno della cassa, e si faceva ad osservare con qual ordine la cera si fondesse su

i diversi cilindri. È chiaro che nel medesimo ordine dovevano stare i poteri conduttori delle sostanze messe a cimento. Così tra i metalli egli trovava esser migliori conduttori l'oro e l'argento ; seguir dappresso e quasi allo stesso grado il rame, lo stagno ed il platino ; ed infine il ferro, l'acciaio ed il piombo. Si trovarono inferiori ai metalli il vetro , la porcellana, la terra cotta ; e peggiori di tutti riuscirono il carbone ed il legno secco.

Metodo di Despretz.

397. Oltre a non offrir mezzo di poter esprimere numericamente i poteri conduttori dei diversi corpi, il metodo d'Ingenhouz aveva ancora il difetto di non far rilevare che le grandi differenze. Così troviamo nei risultamenti da lui ottenuti che il rame e lo stagno dovessero avere poteri conduttori presso che eguali, quantunque quello del primo sia in realtà più che triplo di quello del secondo.

Questi difetti si trovano eliminati nel metodo seguito da Despretz,che intraprese delle ricerche sperimentali sui poteri conduttori dei corpi, a fine di verificare i risultamenti ottenuti dai geometri circa la distribuzione del calore nell'interno dei solidi. I corpi da lui messi a cimento avevano forma di verga parallelepipeda a base quadrata di 21 millimetri di lato, e che in tutta la loro lunghezza erano coperte di uno strato di vernice, doppio per quanto richiedevasi a rendere eguali le loro *conducibilità esterne*, o sieno attitudini a trasmettere nello spazio ambiente il calore accumulato nel loro interno. Le verghe, orizzontalmente sostenute , venivano riscaldate in una delle loro basi mercè la fiamma di una lucerna, ed il calore che di là diffondevasi per la loro lunghezza , era misurato da termometri che coi loro serbatoi scendevano in cavità scolpite nella faccia superiore della verga e piene di mercurio. E queste cavità si allontanavano dalla sorgente per quantità crescenti in progressione aritmetica , per vedere se i corrispondenti eccessi di temperatura sul mezzo ambiente formassero, come indicava il calcolo , una progressione geometrica decrescente. Ponendo a cimento delle verge di rame, ferro, stagno, zinco, piombo e marmo, Despretz si ebbe i seguenti risultati.

TERMOMETRI.	ECCESSO DELLA TEMPERATURA INDICATA DAI TERMOMETRI SU QUELLA DELLO SPAZIO AMBIENTE.					
	Rame	*Ferro*	*Stagno*	*Zinco*	*Piombo*	*Marmo*
1°.	66°,36	62°,90	63°,41	64°,17	65°,13	63°,91
2°.	46 ,28	36 ,69	35 ,17	38 ,02	29 ,42	6 ,08
3°.	32 ,62	20 ,52	21 ,52	25 ,43	14 ,93	1 ,95
4°.	24 ,32	12 ,32	15 ,52	17 ,93	9 ,99	1 ,47
5°.	18 ,63	8 ,19	»	»	»	»
6°.	16 ,18	6 ,61	»	»	»	»

Or dividendo l'eccesso di temperatura del 1° termometro per quello del 2°, questo per quello del 3°, ecc. si hanno le seguenti serie di quozienti:

	Rame,	*Ferro,*	*Stagno,*	*Zinco,*	*Piombo,*	*Marmo*
$\frac{1°}{2°}=$	1,4	1,7	1,8	1,7	2,2	10,5
$\frac{2°}{3°}=$	1,4	1,8	1,6	1,5	2,0	3,1
$\frac{3°}{4°}=$	1,3	1,6	1,4	1,4	1,5	1,3
$\frac{4°}{5°}=$	1,3	1,5	»	»	»	»
$\frac{5°}{6°}=$	1,2	1,2	»	»	»	»

Dai numeri contenuti in quest' ultima tavola si rileva che i risultamenti ottenuti rispetto al rame ed al ferro, sono stati quelli che meglio han corrisposto all' idea di una progressione geometrica; quelli pel marmo sono stati al contrario i più divergenti.

Or l' analisi matematica suppone che la verga sia di lunghezza infinita e di sostanza fisicamente omogenea. E se la prima di queste condizioni è mancata in tutte le verghe, la struttura cristallina del marmo ha fatto che in questo sia mancata anche la seconda; quindi la ragione della massima divergenza da un quoziente costante osservata nell'ultima verga.

Da risultamenti ottenuti coll' esposto metodo il calcolo ha tratto i seguenti valori numerici rispetto ai poteri conduttori delle diverse sostanze, qui appresso indicate.

Nomi delle sostanze.	*Poteri conduttori.*
Oro	1000
Platino	981
Argento	973
Rame	808
Ferro	374
Zinco	363
Stagno	303
Piombo	180
Marmo	24
Porcellana	12
Terra cotta	11

De la Rive sperimentando su diverse specie di legno con un metodo simile a quello del Despretz, ha trovato che il calore è meglio condotto nel senso delle fibbre che in direzione ad esse perpendicolare; e che dei seguenti legni messi a pruova il potere conduttore riusciva decrescente nell' ordine: *rovere, noce, quercia, abete, pioppo, sughero.*

Il potere conduttore del legno in generale è inferiore a quello della porcellana e della terra cotta; e minore ancora è quello dei corpi nello stato di polvere, come la cenere, o che abbiano struttura filamentosa, come il cotone, la lana, la seta le piume, la paglia, ecc.

Conduzione nei corpi cristallizzati.

398. Il fatto (n° 79) della ineguale dilatazione che il calore produce secondo la diversa direzione che si considera in un cristallo birifrangente, faceva credere che vi fosse ancora vario il potere conduttore. La realtà di questa opinione è stata dimostrata da Senarmont con esperimenti appositamente eseguiti. Egli toglieva dai cristalli delle laminette che riduceva a piccoli dischi del diametro tutto al più 38^{mm} e doppie di 1 a 2^{mm}. Nel centro della lamina scolpiva un piccolo foro, per poterla così poggiare sull' estremità alquanto conica di un filo metallico buon conduttore, che coll' altro estremo voltato a spira veniva riscaldato dal contatto di una fiamma.

Sulla lamina stava disteso uno strato di cera, che fondendosi nello spazio ambiente il foro centrale, si ritirava in un orlo rilevato, che disegnava l'andamento dell'isoterma, e che raffreddato lasciava misurarne le dimensioni. L'isoterma riusciva sempre circolare, sia che la lamina fosse metallica, o tolta da un cristallo privo di doppia rifrazione, od in fine da un cristallo birifrangente ed in direzione perpendicolare all'asse. Ma se la lamina fosse stata parallela all'asse del cristallo, allora l'isoterma assumeva una forma ellittica il cui asse maggiore si trovava diretto come l'asse del cristallo. Nei corpi birifrangenti dunque il potere conduttore è massimo nel senso dell'asse, e minimo nelle direzioni che gli sono perpendicolari.

399. I liquidi sono cattivi conduttori del calore; e per averne una prova convincente basterà ripetere l'esperimento che segue. Per un foro scolpito nella parete laterale di un recipiente introducasi un termometro, e con un pezzo di sughero lo si fermi orizzontalmente in modo da rimanerne visibile la sommità della colonna liquida nel cannello. Allora si empia di acqua il recipiente fino ad un pollice circa sul serbatoio termometrico, e sulla superficie del liquido si versi pian piano dell'olio bollente, o la si cuopra di uno strato di spirito di vino e vi si appicchi il fuoco. Sia nell'uno, sia nell'altro modo di comunicar calore alla superficie dell'acqua, si vedrà scorrere un bel pezzo di tempo prima che la temperatura del termometro si elevi di un sol grado. *Conduzione nei liquidi e negli aeriformi.*

Despretz, sperimentando sopra colonne di acqua alte un metro e di 2 a 4 decimetri di diametro, e sul cui livello faceva pervenire continuamente dell'acqua calda, ebbe tali temperature dai termometri che aveva situati a diverse profondità nella colonna liquida, da doverne arguire che il potere conduttore dell'acqua è almeno 95 volte minore di quello del rame; e poichè questo nella tavola dei poteri conduttori si trova rappresentato dal numero 808, così quello dell'acqua dovrà esserlo dal numero 8, 5; e quindi riesce inferiore anche al debole potere della terra cotta, che in quella stessa tavola è rappresentato da 11.

Peggiore che nei liquidi è la conduzione termica dei corpi aeriformi ; nei quali la trasmissione del calore riescè assai malagevole, quando vi sieno a sufficienza impedite le correnti pel cui mezzo essi facilmente si riscaldano o si raffreddano. È così che le doppie invetriate preservano le abitazioni dal freddo invernale ; e così ancora nelle coverture e nei cuscini la naturale resistenza al moto termico del cotone o delle piume di cui sono imbottiti si trova accresciuta dall'aria interposta ai filamenti della loro sostanza. Il conte Rumford , a cui si debbono ingegnosi sperimenti sul potere conduttore dei liquidi e dei gas , trovava più lento il raffreddamento di un globo di cristallo pieno di aria o di acqua , allorchè a questi fluidi stavano misti dei corpi fiocconosi.

La resistenza pertanto alla trasmissione termica non è la stessa in tutti i corpi aeriformi. Dulong e Petit trovarono che un corpo si raffredda più celeramente nel gas idrogeno che nell'aria o nell'acido carbonico ; e Grove osservava più tardi che facendo passare la corrente elettrica successivamente per due fili di platino, l'uno immerso nel gas idrogeno , e l'altro nell'aria o nell'acido carbonico , il primo non dava segno di ignizione mentre il secondo era già arroventato.

CAPO SECONDO.

DEL RAFFREDDAMENTO.

Definizioni. 400. Dicesi *celerità di raffreddamento* la maggiore o minor quantità di gradi, di cui in un dato tempo scende la temperatura di un corpo più caldo del mezzo ambiente. Così se di due corpi, che supponiamo di 50 gradi più caldi del mezzo che li circonda, l'uno perda 10 gradi di calore mentre l'altro ne perde 5, diremo che il primo ha una celerità di raffreddamento doppia di quella del secondo.

I rapporti poi che si troveranno esistere tra le perdite di

calore fatte da un corpo nelle successive unità di tempo, costituiranno la *legge* del suo raffreddamento. Così se un corpo di 100 gradi più caldo dello spazio ambiente, ne perdesse 18 nella 1ª unità di tempo, 12 nella 2ª, 8 nella 3ª, e così di seguito; diremmo che le sue perdite di calore formano una progressione geometrica decrescente, la cui ragione è $\frac{2}{3}$; e nel fatto di questa ragione costante tra le successive perdite di calore in tempi eguali starebbe la legge del suo raffreddamento. Quindi si comprende come il raffreddamento, attuandosi in più corpi con celerità differentissima, possa ciò non ostante esser retto da una medesima legge. Così se un corpo raffreddandosi perdesse 3 gradi di calore nella 1ª unità di tempo, 2 nella 2ª, $1+\frac{1}{3}$ nella 3ª, e così di seguito, il suo raffreddamento sarebbe sottoposto alla medesima legge che nell'esempio precedente, quantunque le perdite fatte in eguali tempi sieno molto differenti.

Influenza della diversa densità di un corpo sulla celerità del suo raffreddamento.

401. Allorchè i metalli sono ridotti a lamine per opera di pressione o di percossa, le parti superficiali, come quelle che hanno ricevuta la maggior dose dell'azione meccanica, avranno una densità maggiore che le parti interne. Con lamine di tal fatta poniamo che si costruisca con recipiente cubico, e che una delle sue facce si righi con una punta che vi lasci de'solchi profondi rispetto alla doppiezza della lamina, si troverà (con mezzi che qui appresso indicheremo) che il cubo, divenuto più caldo del mezzo ambiente, emetterà per la faccia rigata maggior copia di calore che per le facce lasciate intatte. Or l'azione della punta non ha fatto che scoprire le parti di minor densità. Il vetro temperato, che a somiglianza delle lamine battute o compresse, possiede una densità decrescente da fuori in dentro, presenta dei fenomeni consimili, secondo che la sua superficie è rigata con una punta, o lasciata nella sua naturale levigatezza.

Al contrario il vetro non temperato, il marmo, l'avorio, il ferro oligisto, ec. in somma tutti i corpi che non hanno densità varia da fuori in dentro, emettono egualmente calore, sia liscia o solcata la loro superficie di emergenza. Che anzi del-

le lamine di oro e di argento, ottenute per via di getto e che si fecero lentamente raffreddare nelle loro forme, han presentato un fenomeno del tutto opposto, imperocchè dalle loro facce rigate con punta di diamante si ebbe minor emissione di calore che da quelle non rigate. E di ciò comprenderemo agevolmente la cagione, se ci faremo a considerare che la pressione esercitata dalla punta ha dovuto addensare la materia nel fondo del solco, più che non era all'esterno.

Tutti questi risultamenti son dovuti a Melloni. Prima di lui, Leslie osservando che le lamine metalliche, quali si hanno in commercio, emettono maggior quantità di calore per le facce solcate che per quelle che non lo sono, aveva stabilito il principio che i corpi a superficie scabrosa emettessero maggior quantità di calore dei corpi a superficie levigata.

Influenza del volume e della figura del corpo.

402. Se con lamine tagliate da una stessa foglia di latta, si facciano recipienti simili di forma, e di grandezza diversa; e riempitili di acqua bollente si facciano tranquillamente raffreddare, si troverà che i recipienti più grandi saranno più lenti a raffreddarsi.

E se i recipienti avessero invece una stessa capacità, ma forme differenti e quindi diversa estensione di superficie, si troverebbe che dove questa fosse più grande, ivi il raffreddamento sarebbe più celere.

Influenza del fluido ambiente.

403. Per dichiarare sia questa influenza, sia le altre che nei seguenti n[i] andremo esponendo, gioverà premettere una succinta esposizione del metodo, con cui Dulong e Petit si fecero ad indagarle nelle loro svariate ricerche su la celerità e le leggi del raffreddamento.

Essi tolsero a subbietto i corpi liquidi, come quelli che raffreddandosi per mezzo di correnti che trasportano il calore dall'interno della massa alle pareti del recipiente, rendono il fenomeno indipendente dalla conduzione interna, per la quale riesce assai complesso il fatto del raffreddamento di un corpo solido. E poichè del liquido messo a pruova bisognava conoscere ad ogn'istante il grado di calore, così scelsero per corpo caldo lo stesso termometro a mercurio, la cui temperatura può elevarsi oltre 300 gradi.

Nella fig. 400 si vede l'apparecchio da essi usato. Un globo M fatto con sottile foglia di rame e del diametro di 3 decimetri, era sostenuto dalle traverse TT in un tino pieno di acqua, la cui temperatura potevasi abbassare immergendovi dei pezzi di ghiaccio, e si poteva elevare mercè una corrente di vapore introdotta per mezzo del tubo LV. La faccia interna del globo era coperta di nerofumo, affinchè il calore emesso dalla pallina del termometro che ne occupava il centro, venisse interamente assorbito, e quindi disperso nell'acqua ambiente per mezzo della sottile foglia di rame. Il globo finiva superiormente con un collo terminato da un orlo piano, per adagiarvi la lamina di vetro AB che per un foro lasciava passare il cannello del termometro che vi era fermato con turacciuolo di sughero, e per altri fori in essa scolpiti faceva comunicare l'interno del globo colla campana di vetro D. Alla quale per mezzo di ghiera metallica provvista di rubinetto, stava unito il tubo di piombo CE, che a piacere dello sperimentatore poteva innestarsi ad una macchina pneumatica per farvi il voto, e quindi al tubo K per immettervi il gas contenuto nella campana G.

Con questo apparecchio si è determinato :

— 1° Che il raffreddamento è meno celere nel voto che in un gas qualunque.

— 2° Che la celerità del raffreddamento varia colla natura del gas. Così mentre pel contatto dell'aria il termometro caldo di 180° sul mezzo ambiente perdeva 4°,75 , pel contatto del gas idrogeno perdeva 16°,59.

— 3° Che per un medesimo gas la celerità del raffreddamento varia secondo una progressione geometrica decrescente, quando per una consimile progressione va cangiando la pressione a cui il gas è sottoposto.

404. Newton aveva stabilito che la perdita di calore fatta da un corpo in dato tempo, dovesse esser proporzionale all'eccesso della temperatura del corpo su quella dello spazio ambiente. Dulong e Petit ottennero in vece i risultamenti che seguono, rispetto alla celerità di raffreddamento nel vacuo. **Influenza dell'eccesso di temperatura del corpo su quella del recinto.**

ECCESSO della temperatura del termometro su quella del recinto.	CELERITÀ del raffreddamento nel recinto a 0°.	CELERITÀ del raffreddamento nel recinto a 20°.	CELERITÀ del raffreddamento nel recinto a 40°.
240	10,69	12,40	14,35
220	8,81	10,41	11,98
200	7,40	8,58	10,01
180	6,10	7,04	8,20
160	4,89	5,67	6,61
140	3,88	4,57	5,32
120	3,02	3,56	4,15
100	2,30	2,74	3,16
80	1,74	1,99	2,30

Dai quali numeri si rileva — 1° Che per un medesimo eccesso di temperatura la celerità di raffreddamento è crescente colla temperatura del recinto, mentre pel principio newtoniano essa dovrebbe essere costante — 2° Che l'eccesso 240° essendo triplo dell'eccesso 80°, la celerità di raffreddamento 10,69 corrispondente al 1° eccesso non è tripla ma più che 6 volte maggiore della celerità 1,74 ottenuta mercè l'eccesso 80°.

Influenza della temperatura del recinto.

405. Dai numeri della tavola precedente si rileva che nel voto cresce la celerità del raffreddamento, quando per un medesimo eccesso di temperatura è più elevata quella del recinto. Ma se in vece di esser voto, lo spazio ambiente fosse occupato da un corpo aeriforme, il dippiù che questo produrrebbe nella celerità di raffreddamento riuscirebbe indipendente dalla temperatura del gas, purchè la pressione rimanesse costante. Così Dulong e Petit trovarono che per un medesimo eccesso di temperatura l'aria chiusa nel globo del loro apparecchio produceva sempre la stessa celerità di raffreddamento, sia che avesse 20° di calore, sia che ne avesse 40°.

CAPO TERZO.

DEL CALORE RAGGIANTE ATTRAVERSO I MEZZI DIATERMICI E LO SPAZIO VOTO.

406. Che i corpi caldi agiscano a distanz, è un fatto noto a tutti ; ma non è egualmente ovvia la conscenza del modo con cui la loro azione si trasmette da un pnto all'altro dello spazio. L'idea che questo moto sia per line retta egualmente che quello della luce, e che al pari di quesı i raggi caloriferi sieno riverberati dalle superficie speculari dev'essere molto antica, stante che la si vede attuata negli secchi ustorii , la cui invenzione fu attribuita ad Archimede,: che non sono altra cosa che specchi concavi di metallo, i quli esposti coi loro assi paralleiamente alla direzione dei ragg solari , fanno divampare i corpi combustibili situati nei lro fuochi principali. Or questo fatto, conseguenza necessari del moto rettilineo del calore e della sua riverberazione anloga a quella della luce , dimostra che queste nozioni han doıto precedere l'invenzione degli specchi ustorii. Prime nozioni sul calore raggiante.

Le stesse idee furono posteriormente rifemate mercè l'esperimento degli *specchi coniugati.* Questo sparecchio si compone di due specchi sferici AB e DE (fig. 41) tirati a martello da una lamina di ottone , e poggiati spra una lunga riga di ferro in modo da confondere i loro ass in una medesima retta *ss'*. Messo nel fuoco principale di un specchio un globetto di ferro rovente, ed in quello dell'alto specchio un pezzetto di esca , questa si vedrà bruciare dpo pochi secondi. Or questa combustione non è prodotta dairaggi direttamente inviati dal corpo rovente all'esca, imperocchè togliendo via or lo specchio prossimo al globetto, or quelle che sta vicino all'esca, il fenomeno si vedrà mancare sì nel'uno che nell'altro caso. I raggi dunque che partendo dal orpo rovente hanno

incontrato lo specchio che gli sta vicino, sono stati da questo inviati sull'altro specchio, che li ha poi concentrati nel suo foco. E per viemeglio accertarsi di questo cammino dei raggi caloriferi, basterà ripetere la prova quando il globetto è appena rosso: l'esca allora non prenderà fuoco, ma lascerà vedere sulla faccia rivolta allo specchio prossimo un' cominciamento di carbonizzazione.

Or se in vece del globetto rovente pongasi in uno dei fuochi un vasellino di sottile lamina metallica, pieno di neve mista a sale, e nell' altro fuoco la pallina di un sensibile termometro, questo si vedrà scendere. Da un simile fatto alcuni vollero arguire che esistessero delle particelle frigorifere, le quali lanciate dalla neve fossero riverberate dagli specchi egualmente che le particelle di calore. Prevost vi scorse al contrario una nuova definizione dell'equilibrio di temperatura, ch'egli qualificò col nome specioso di *equilibrio mobile*. L' idea che il calore fosse un fluido che rende i corpi più o meno caldi a norma della maggiore o minor quantità con cui vi si trova, doveva necessariamente far riguardare l' equilibrio di temperatura tra più corpi, come simile a quello di un liquido in più vasi comunicati. Nell' apparente irradiazione del freddo Prevost vide al contrario che un tale equilibrio non è quiete del fluido calorifero, ma bensì un'eguaglianza di reciproca irradiazione; imperocchè se nell'esperimento col globetto infuocato, questo si raffredda perchè emette più calore di quello che riceve; così ancora nell' esperimento colla neve il termometro si raffredda perchè la neve dà meno di quel che in cambio ne acquista. E che la neve irradii il suo debole calore, come sensibilmente fa ogni corpo che sia più caldo del mezzo ambiente, può in modo meraviglioso venir chiarito in quei luoghi il cui freddo invernale scende a molti gradi sotto zero. Quando nell' aria si avrà un simile freddo, espongasi all'ambiente libero l'apparecchio degli specchi coniugati, e messa in uno dei fuochi la pallina termometrica, pongasi nell'altro un pezzo di ghiaccio, che a fine di ottenerlo alla temperatura 0° siasi lasciato per qualche tempo in una stanza calda;

si vedrà allora il termometro salire pei raggi che riceve dal ghiaccio.

L' esperimento degli specchi coniugati fu ripetuto da H. Davy nel voto pneumatico. L' apparecchio componevasi di un cilindro di cristallo (Fig. 404) chiuso da due piani metallici, ai quali stavano fermati i due specchi. Per due fori scolpiti nella base superiore del cilindro passavano altrettanti tubetti di vetro destinati ad isolare i reofori di una pila, i quali nel fuoco *m* dello specchio superiore si univano con un pezzetto di carbone, mentre nel fuoco *n* dello specchio inferiore stava la pallina di un sensibile termometro orizzontalmente adagiato. Applicato il cilindro al meato di una macchina pneumatica, e fattovi il voto, si stabiliva il circuito elettrico; allora si vedeva il carbone divenire incandescente, e moversi la colonna liquida nel tubo termometrico.

Termometro differenziale di Leslie — Termoscopio di Rumford.

407. Leslie nella Scozia ed il conte Rumford in Francia, facendosi a studiare l'azione del calore raggiante, si avvidero come all'uopo bisognasse un termometro che insensibile ai cangiamenti termici dello spazio ambiente, lasciasse rilevare soltanto quelli prodotti dal flusso calorifero, a cui viene esposto. Leslie a ciò provvide col suo *termometro differenziale*, Rumford col suo *termoscopio*.

Il termometro differenziale si compone (Fig. 403) di un tubo di cristallo che voltato due volte ad angolo retto, termina in due palline. Il tubo è pieno in gran parte di liquido colorato, a cui sovrasta alquanta aria diffusa nelle palline. Finchè queste avranno una stessa temperatura, la colonna liquida resterà immobile sotto le pressioni delle due masse di aria, che comunque potessero variare riusciranno sempre eguali. Ma se una delle palle divenga più calda dell' altra, allora l' ineguale pressione dell' aria interna farà movere la colonna liquida dalla prima verso la seconda; e per conoscere il più o meno di questo movimento, il tubo è provveduto di una scala.

Sullo stesso principio è costruito il termoscopio del conte Rumford; ma è più sensibile del termometro differenziale,

di cui ha più lungo (Fig. 404) il lato orizzontale, e più corte le branche verticali. E la sua maggior sensibilità dipende dalla piccola lunghezza che vi ha la colonna del liquido indicatore, che così può correre pel lato orizzontale del tubo, non opponendo alla squilibrata tensione delle masse di aria contenute nelle due palle che la piccola adesione del liquido al vetro. A quest' adesione che nel termometro differenziale si trova più grande attesa la maggior lunghezza della colonna liquida, si aggiunge poi la pressione nascente dalla differenza di livello nelle due branche verticali del tubo.

Termomoltiplicatore di Nobili perfezionato da Melloni.

408. Dopo che Seebeck (n° 277) ebbe scoperto che un cangiamento di calore nella saldatura di due metalli differenti vi genera una corrente elettrica, il prof. Nobili componeva un apparecchio che valesse riceversa a far rilevare dalla quantità della corrente ingenerata quella del cangiamento termico che l' ha prodotta. Questo apparecchio è il *termomoltiplicatore*. Nobili lo componeva con sei coppie di verghette di bismuto ed antimonio, che saldate a zig-zag raffiguravano in certo modo ad un prisma, nelle cui basi stavano da un lato tutte le saldature di ordine pari, dall' altro quelle di ordine impari. Questa foggia di prisma era chiusa in una cassa cilindrica, in fondo alla quale giacevano circondate di mastice le saldature di ordine pari, mentre le altre sporgevano fuori la cassa dal lato opposto; in fine due fili conduttori che univano gli estremi della catena metallica ai capi di un galvanometro moltiplicatore, rendevano completo l' apparecchio.

Bastava applicare sulle saldature libere un corpo a temperatura alquanto diversa da quella delle saldature immerse nel mastice, perchè l'ago galvanometrico venisse tosto deviato. Il termomoltiplicatore era quindi uno squisito termometro di contatto; ma come *termattinometro* (ossia misuratore del calore raggiante) rimaneva da meno dei termoscopii di Leslie e di Rumford, stante che il calore del mezzo circonfuso non poteva egualmente agire su i due ordini di saldature.

Questo apparecchio è stato perfezionato da Melloni — 1°. Rendendo perfettamente eguali le condizioni delle due basi del-

la pila — 2°. Dimostrando con esperimenti decisivi che coprendo le due basi di nero fumo, le si rendono atte ad assorbire secondo una ragione costante i flussi di raggi calorifici, qualunque ne sia la sorgente — 3°. Facendo che le verghette di bismuto ed antimonio fossero più piccole e più numerose che non erano nella scatola termoelettrica del Nobili; la qual cosa ha resa la pila estremamente sensibile ai minimi flussi di raggi caloriferi.

Così la pila è venuta a comporsi (Fig. 405) di 25 a 30 coppie di verghette di bismuto ed antimonio, ciascuna della lunghezza di 20 millimetri, doppia 1 e larga 2. Esse mercè di alternate saldature nei capi estremi sono riunite in forma di parallelepipedo, in cui restano separate l' una dall' altra per piccoli pezzi di carta verniciata, sufficiente ad impedire la trasfusione laterale della corrente. Il parallelepipedo è chiuso in un tubo di ottone di egual forma, ma alquanto più corto, affinchè le due estremità della pila ne sporgessero fuori; ed a questo primo tubo ne vanno aggiunti due altri a modo di appendici, e che nella figura si veggono staccati da quello di mezzo, per farne meglio rilevare la forma ed il modo di unione. Questi tubi addizionali servono al doppio scopo, di liberare cioè la pila da ogni flusso calorifero, quando si chiudono gli sportellini di cui sono provveduti, e lasciarla esposta ai soli raggi incidenti sulle basi, quando gli stessi sportellini sono alzati.

Sappiamo (n° 279) ch' esiste una certa ragione di diametro e lunghezza nel filo conduttore di una corrente elettrica, perchè il deviamento galvanometrico risulti un massimo. Le ricerche all' uopo istituite sul termomoltiplicatore hanno mostrato esser conducente alla sua squisita sensibilità che il filo galvanometrico vi sia doppio 0,7 di millimetro, lungo 27 metri, ed avvolto al telaio con 168 giri.

Perchè il termomoltiplicatore potesse indicare i rapporti delle quantità di raggi assorbiti dalla faccia attiva della pila, faceva d' uopo conoscere tanto la relazione che passa tra la quantità del deviamento e la forza della corrente, quanto quella

che unisce la forza della corrente al grado di calore comunicato alla faccia della pila. Per determinare la 1ª di queste dipendenze, Melloni si è servito di due metodi diversi, di cui prescegliamo il seguente. Egli poneva la pila, già provvista dei suoi tubi addizionali a sportelli alzati, tra due lucerne di Carcel, contro i cui raggi essa era difesa da due parafuochi. Abbatteva ne uno, e prendeva nota del deviamento a cui l'ago si fermava: indi lo rialzava, e quando l'ago era tornato al suo zero, invertiva le communicazioni della pila col galvanometro, abbatteva l' altro parafuoco, e faceva variare la distanza della lucerna dalla faccia attiva della pila, finchè avesse ottenuto una deviazione di un solo grado inferiore alla prima: se per esempio questa era stata di 10 gradi, egli faceva in modo che la seconda fosse di 9. Si avevano così due correnti i cui effetti galvonometrici differivano di un grado; e rimaneva a sapersi qual ragione la differenza di queste due correnti avesse con quella che avrebbe fatto muovere l' ago da 0° ad 1°.

A tal uopo Melloni rialzava anche il secondo parafuoco, e quando l'ago già stava sullo zero, egli li abbatteva ad un tempo, ed osservava il deviamento che ne risultava. Ponendo che questo fosse rappresentato dalla quantità angolare $\frac{m}{n}$, è chiaro che la differenza delle due correnti prima ottenute, equivaleva alla corrente che avesse prodotto il deviamento $\frac{m}{n}$. Or per deviamenti che non eccedevano i primi 15 gradi del quadrante galvanometrico Melloni trovò costantemente $\frac{m}{n}=1$; vale a dire che fino a 15° egli trovò la forza della corrente proporzionale al grado del deviamento. E quanto ai gradi superiori a 15, egli è facile comprendere come col metodo esposto Melloni avesse potuto costruire una tavola, nella quale a fianco di ciascun valore angolare stava scritto il valore della corrente che lo produceva, togliendo sempre ad unità quella che faceva movere l' ago da 0° ad 1°.

Conosciuta così la dipendenza del deviamento galvanome-

trico dalla forza della corrente, rimaneva a conoscere la relazione di questa colla differenza di temperatura tra le due facce della pila. A tal uopo Melloni compose un elettromotore di bismuto ed antimonio con elementi voltati a ferro di cavallo (Fig. 407); immerse un ordine di saldature nel recipiente M contenente del ghiaccio pesto, l'altro ordine in N che aveva dell'acqua a 0°, e pose nei recipienti due termometri assai sensibili e di perfetto accordo. Allorchè la temperatura dell'acqua erasi elevata di 1° su quella del ghiaccio pesto, l'ago galvanometrico già si vedeva allontanato di oltre a 70° dalla linea del suo zero. Così la comparazione diveniva impossibile per troppa sensibilità del reometro, e Melloni si fece a ridurne gli effetti per mezzo di una derivazione, ch'egli otteneva unendo ai capi *a* e *b* (fig. 408) due fili che faceva pescare nei vasellini *v* e *v'* a metà pieni di mercurio e congiunti tra loro per mezzo del filo *e*. Regolata la derivazione in modo che un grado di differenza tra le temperature dei due ordini di saldature non facesse muovere l'ago che di un solo grado, egli vide che pei primi 10 a 12 gradi la differenza di calore tra le due basi della pila e la quantità del deviamento galvanometrico progredivano di egual passo, cosicchè le due variazioni erano contemporaneamente rappresentate dai n^{i} 1, 2, 3, 4, ec. Nei gradi superiori la coincidenza più non ebbe luogo, ma consultata la tavola che dava la forza della corrente in corrispondenza della quantità di deviamento, si trovò la prima esser proporzionale alla differenza di temperatura tra le due basi della pila. E così il termomoltiplicatore è risultato un vero termometro.

Da ultimo, considerando che l'ago fa molte oscillazioni prima di giungere al suo deviamento definitivo, Melloni si fece a costruire una tavola per mezzo della quale si potesse dedurre dal moto impulsivo dell'ago la sua definitiva posizione. La qual cosa egli menò ad effetto osservando di 5 in 5 gradi qual differenza esistesse tra il primo impulso ricevuto dall'ago, e la sua finale giacitura di equilibrio. Così non solamente il termomoltiplicatore si è fatto idoneo a valutare i flussi calorifici

di brevissima durata; ma le ricerche intorno al calore raggiante si son potute moltiplicare in ragione dell'economia di tempo che si è ottenuta.

Sorgenti calorifere costanti.

409. In tutte le ricerche sul calore raggiante si ha bisogno di sorgenti calorifere che conservino una temperatura costante. Tal sarà, a modo di esempio, un recipiente metallico annerito nella superficie esterna e pieno di acqua mantenuta in dolce ebollizione per mezzo di una fiamma a spirito di vino. Preservando la pila del termomoltiplicatore dai raggi della fiamma per mezzo di parafuochi convenientemente disposti, si avrà sotto la pressione barometrica $0^m,76$ una sorgente costante di calore oscuro a 100°.

Un'altra sorgente di calore oscuro di temperatura più alta si ha in una lamina di rame, annerita in una faccia, e messa coll'altra a contatto di una fiamma di spirito di vino. Rispetto a questa sorgente Melloni ha trovato col metodo delle mescolanze che una lamina di rame doppia mezzo millimetro e di 20 a 22 centimetri quadrati di superficie, si eleva a 400°, quando per un terzo della sua estensione è colpita dalla fiamma di una lucerna a spirito di vino. Questa sorgente calorifera è costante, imperocchè facendola agire a distanza sulla pila del termomoltiplicatore, l'ago galvanometrico conserva invariato il suo deviamento.

Oltre al calore oscuro è necessario ancora studiar quello delle fiamme e dei corpi roventi. Rispetto alle prime il termomoltiplicatore ha mostrato esser costanti le irradiazioni di una lucerna di Argant, di Locatelli ec.; e Melloni ha ottenuto un corpo rovente a temperatura costante circondando una fiamma a spirito di vino con una spirale di platino, la quale fa sparire la fiamma e rimane incadescente.

Moto rettilineo del calore.

410. L'esperimento degli specchi ustorii ci ha dimostrato indirettamente che il calore nella sua azione in distanza assume la forma raggiante. Di questo dato fondamentale Melloni ne ha trovata la seguente prova semplicissima e diretta. Fermato verticalmente un parafuoco metallico abbastanza grande e forato nel centro, si dispongano all'altezza del foro

e nella distanza di alquanti decimetri, da un lato la lamina di rame riscaldata a 400°, dall'altro la pila del moltiplicatore. Dopo aver ordinate pila e lamina in modo che la congiungente i centri delle loro facce passi pel centro del foro, comunque quelle sieno inclinate al piano del parafuoco, si prenderà nota del deviamento definitivo dell'ago; indi da quella linea si farà deviare sia la lamina sia la pila, e tosto si vedrà l'ago muoversi verso lo zero, ed ivi giungere quando nessuna retta menata per la lamina e pel foro possa incontrare la faccia attiva della pila.

La celerità poi che hanno i raggi caloriferi nel percorrere lo spazio non si è potuta misurare come si è fatto per la luce, stante che la sensibilità del termomoltiplicatore, quantunque sia tanta da far avvertire il calore irradiato dal corpo umano alla distanza di 50 piedi, purtuttavia rimane incomparabilmente inferiore a quella dell'occhio che avverte le ecclissi del 1° satellite di Giove alla distanza di molti milioni di leghe. Ciò che a tal riguardo ha potuto fare il Melloni, è stato quello di chiarirla grandissima. Per la qual cosa egli prese a sorgente calorifera la fornace di una fonderia di vetro, i cui raggi giungevano alla pila del termomoltiplicatore situata in una casa che stava 357 piedi lontana dalla bocca del forno; e due parafuochi, fatti di più lamine metalliche parallele, stavano situati in modo da poter intercettare i raggi del calore, l'uno presso la sorgente, l'altro prossimamente alla pila. A tempi convenuti e misurati con due cronometri messi in perfetto accordo, furono abbattuti or l'uno or l'altro parafuoco, e ad ogni volta fu determinato il numero di secondi impiegato dall'ago per giungere al massimo deviamento impulsivo. I due numeri riuscirono perfettamente eguali, vale a dire che il calore percorse 357 piedi in un tempo così piccolo da non potersi valutare.

411. La ragione dell'intensità alla distanza è necessariamente una cognizione empirica per quegli agenti naturali, come l'elettricità, la gravità, il magnetismo, che ci sono noti soltanto per quantità; ma per quegli agenti di cui ci è nota

L'azione termica a distanza segue la ragione inversa dei quadrati.

la forma ancora dell'azione, la suddetta dipendenza è un'illazione logica necessaria. Così il calore e la luce, che sotto forma di raggi emessi da un centro diffondono la loro azione per lo spazio ambiente, debbono necessariamente seguire la ragione inversa dei quadrati delle distanze.

A fine di rifermare coll'esperienza questa legge, varii ma inutili tentativi erano stati menati ad effetto, quando il Melloni riusciva ad escogitarne uno di sorprendente semplicità. Immaginiamo un recipiente conico *abc* (Fig. 409) la cui faccia interna fosse incapace di riverberare una benchè minima quantità di raggi calorifici; che nel vertice di questo cono si trovasse la faccia attiva della pila termoelettrica, e che la sua base *ac* giacesse parallela alla parete PQ, più calda del mezzo ambiente. Tutti i raggi, che dal circolo di diametro *st* la parete invierà convergenti al vertice *b* del cono, agiranno sulla pila e vi produrranno un effetto, la cui grandezza dinotiamo con *k*. Or facciamo che il cono scorrendo su la linea del suo asse prenda la posizione $a'b'c'$; allora nell'ipotesi che l'azione termica per un dato grado di calore rimanesse invariata a qualunque distanza. la pila riceverebbe un'azione il cui effetto k' sarebbe semplicemente proporzionale al cerchio di diametro $s't'$. Ma ponendo $bz=d$ e $b'z=d'$, le aie dei due cerchi sono nel rapporto di $d^2 : d'^2$; dunque si avrebbe:

$$k:k'=d^2:d'^2\text{, donde } k'=k\frac{d'^2}{d^2},$$

Ma se in vece l'azione termica variasse nella ragione inversa dei quadrati delle distanze, l'effetto k' per potersi comparare a k, dovrebbe essere moltiplicato pel rapporto $d^2 : d'^2$; ed in questa ipotesi avremmo:

$$k'=k\frac{d'^2}{d^2}\cdot\frac{d^2}{d'^2}\text{, ossia } k'=k.$$

Dunque se la ragione inversa dei quadrati delle distanze ha realmente luogo, il deviamento galvanometrico dovrà rimanere invariato qualunque sia la distanza del cono dalla parete PQ.

La fig. 410 rappresenta il modo di attuazione dell'esperimento. Un parafuoco metallico, avente nel centro un foro di 10 a 15 millimetri di diametro, era mobile sulla riga orizzontale *cd*, fissa al sostegno della pila SP, il cui asse coincideva con quello del foro: dal lato opposto stava la superficie riscaldata M N, la quale era quella di un recipiente di acqua bollente, e talvolta la parete di un muro più caldo dell'aria ambiente. Situata che ebbe la pila col suo sostegno a tal distanza dalla MN che le rette menate dalla faccia della pila tangenzialmente all'orlo del foro non cessassero d'incontrare la parete raggiante, egli fece lentamente avanzare il sostegno della pila e del parafuoco lungo la retta KN perpendicolare alla parete MN, e vide l'ago rimanersi immobile sul punto del quadrante a cui si era fermato nel primo deviamento.

412. Attraverso i corpi trasparenti i raggi luminosi conservano nell'agitazione del corpo che percorrono, la stessa linea di moto che avrebbero seguita nella sua quiete. I raggi solari che per un foro entrano in una stanza, colpiscono in un dato istante un dato punto dell'opposta parete, sia l'aria in perfetta calma, sia agitata da vento tempestoso, e se al foro stia applicata una lamina di vetro o di altro corpo trasparente, si vedrà il cammino del fascetto luminoso risultare indipendente dalla quiete o dall'oscillazione del corpo traslucido parallelamente al piano del foro. Diatermasia.

Questi fatti provano ad evidenza che nel passaggio della luce attraverso la materia ponderabile il moto non procede da falda a falda del mezzo in cui si attua.

Fenomeni perfettamente simili si hanno dal calor raggiante. Scheele aveva osservato che il calore emanato dalla bocca di una stufa, sia che corresse per un'aria calma o che nel suo cammino fosse tagliato ad angolo retto da un vento impetuoso, sempre al medesimo grado si concentrava nel fuoco di uno specchio concavo messogli d'incontro.

A risultamenti del tutto conformi è pervenuto Melloni mercè del termomoltiplicatore. Quando per effetto di un'irradiazione termica costante l'ago aveva toccato un deviamen-

to definitivo, egli spingeva con un manticetto una corrente di aria attraverso il cammino dei raggi, e purchè la pila e la sorgente termica fossero preservate dai cangiamenti di temperatura che la corrente di aria poteva recarvi, egli trovava l'ago immobile nel suo primo deviamento.

Dippiù, egli piantava verticalmente un parafuoco *mn* (Fig. 411) su cui stava scolpito un piccolo foro, chiuso da una lamina trasparente *ab* applicatavi sopra; sull'asse del foro poneva da un lato la pila termoscopica, dall'altro una sorgente costante di calore; e quando l'ago era giunto al suo stabile deviamento, egli faceva oscillare la lamina parallelamente al piano del foro, e vedeva l'ago rimanersi immobile.

Vi è dunque una trasparenza pel calore identica a quella che ha luogo rispetto alla luce. Melloni l'ha denominata *diatermasia* (da *dia* attraverso, e *termao* riscaldo). Quindi un corpo si dirà *diatermico* o pure *adiatermico*, secondo che sarà trasparente od opaco pel calore.

La diatermasia di un corpo non segue tuttavia la ragione della sua traslucidezza. L'acqua e l'allume limpidissimo non sono gran fatto permeabili dal calore: al contrario il salgemma, ancorchè appena traslucido, è il corpo più diatermico che si conosca; ed il vetro nero, la mica nera, che messi tra l'occhio e il sole non fanno scorgere verun chiarore, hanno molta trasparenza pei raggi calorifici.

Riverberazione sulla superficie dei corpi diatermici.

413. È noto che della luce incidente sulla superficie di un corpo diafano, una parte n'è riverberata l'altra penetra nel corpo. Altrettanto avviene del calore raggiante nell'incontro con un mezzo diatermico; ed in vero, facendo che un flusso calorifico costante incontri normalmente or una lamina di vetro di una certa doppiezza, or più lamine dello stesso vetro, le cui doppiezze sommate insieme pareggino quella della prima, si troverà nel secondo caso una minor quantità di raggi emergenti che nel primo. Ciò che dal vetro si è assorbito, ha dovuto esser lo stesso nei due casi, perchè eguali sono state le doppiezze superate dai raggi calorifici; la differenza dunque non ha potuto derivare che dalle riverberazioni avvenute nelle

superficie d'incidenza ed emergenza, più numerose nel secondo caso che nel primo.

Un corpo permeabile dalla luce che non apportasse ai raggi incidenti altra diminuzione fuorchè quella prodotta dalle riverberazioni sulle superficie d'incidenza ed emergenza, sarebbe perfettamente traslucido. Per la stessa ragione il salgemma dovrà dirsi perfettamente diatermico, imperocchè fra certi limiti di spessezza Melloni ha trovato che questa sostanza trasmette costantemente 0,923 del flusso calorifero incidente, qualunque ne sia la sorgente. E poichè questa quantità trasmessa rimane la stessa, sia l'incidenza normale, sia inclinata di 25° a 36°, è chiaro che le riflessioni secondarie sono presso che nulle, e che la diminuzione patita dai raggi incidenti è semplicemente la somma delle prime riverberazioni avvenute nelle due superficie. Perciò chiamando x la quantità di raggi riverberati dalla superficie d'incidenza, $1-x$ sarà quella penetrata nel mezzo, e di cui la superficie di emergenza riverberando la parte $x(1-x)$, avremo per determinare x l'equazione:

$$x+x(1-x)+0,923=1;$$

donde $x=0,04$.

Nè solamente dalla superficie del salgemma, ma da quella ancora di ogni altro corpo diatermico sono riverberati costantemente 0,04 dei raggi incidenti; imperocchè Melloni, dopo aver resa (con un metodo che esporremo nel capo seguente) la perdita dei raggi calorifici indipendente dalla doppiezza del mezzo, ha trovato che n'emergeva la stessa frazione 0,923 a cui dà passaggio il salgemma.

Di questa proprietà dei corpi diatermici Melloni ha fatta un'ingegnosa applicazione alla misura del potere riflettente di quelli che sono opachi pel calore. Egli riceveva sulla pila termoscopica il fascio dei raggi riverberati da uno di questi corpi, e ne misurava la quantità; indi sostituiva al corpo adiatermico una lamina di vetro o di cristallo di monte, egualmente ampia ed assai doppia, e misurava del pari l'energia

del fascetto riflesso; divideva in fine il primo numero pel secondo, moltiplicava il quoziente per 0,04, e nel prodotto otteneva l'espressione del potere riflettente del corpo messo a prova. Così ebbe che l'ottone perfettamente levigato riverbera circa 0,45 del calore incidente.

Rifrazione dei raggi calorifici.

414. I raggi di calore patiscono nella superficie di separazione di due mezzi inegualmente densi una rifrazione simile a quella dei raggi luminosi. Rappresenti A (Fig. 412) la proiezione orizzontale di un cubo di latta contenente acqua che bolle per azione di una sottoposta lucerna; *mn* sia quella di un parafuoco verticale che per un foro che vi è scolpito, lascia passare un fascio dei raggi calorifici che gl' invia l' opposta faccia del cubo, e che vanno poi ad incontrare l'angolo rifrangente B di un prisma di salgemma. Se i raggi nell' emergere da questo corpo conservassero la direzione che seguivano nell' incidenza, la pila situata in *p*, sull' asse del foro, ne riceverebbe l' azione; al contrario si vedrà l'ago rimanere tranquillo ed allora soltanto mettersi in moto, quando la pila sarà trasportata in una certa posizione p', in cui può essere incontrata dai raggi rifratti dal prisma di salgemma.

Polarizzazione del calore.

415. Bèrard scovriva nel 1810 che i raggi calorifici possono essere polarizzati come quelli della luce. Questo fatto messo in dubbio da ricerche posteriori, fu pienamente assicurato dal Melloni. S' immagini un tubo simile a quello del polariscopio rappresentato nella fig. 384, e che nell'interno contenga due pile di mica, di cui si possa far variare la inclinazione delle facce sull' asse del tubo. Sulla direzione di questo asse stanno da un lato la pila termoscopica, dall' altro una sorgente costante di calore, i cui raggi son resi paralleli da una lente di salgemma. Allora si vedrà l'effetto termoscopico variare secondo che i piani di rifrazione delle due pile saranno paralleli o perpendicolari tra loro; la qual cosa non potrebbe aver luogo, se i raggi calorifici non fossero stati polarizzati dalla prima pila che hanno incontrata nel loro cammino.

CAPO QUARTO.

DELLA TERMOCROSI.

416. Prima di venir esponendo i principali fatti scoverti da Melloni nella nuova categoria di fenomeni, che forma il subbietto di questo capo, gioverà dare un'idea dell'apparecchio da lui inventato. Si compone di una riga di ottone AB (Fig. 413) che giace di taglio su i due piedi S,S', che la tengono alta di quattro a cinque centimetri sulla tavoletta TT' orizzontalmente sorretta dalle quattro viti V. Intorno ad un asse verticale fermato alla AB è mobile l'altra riga CD lunga di un terzo della prima, e destinata a portare il sostegno della pila termoscopica R. Alla stessa riga A B stanno uniti i tre parafuochi O,N,E, di cui il primo lascia passare per un foro che ha nel centro un fascio di raggi calorifici provvenienti dalla sorgente M; il secondo serve ad intercettarli quando si vuole; ed il terzo è destinato a preservare la faccia attiva della pila dai flussi calorifici, che estranei alla sorgente adoperata, potessero per avventura colpirla. I sostegni dei parafuochi, della pila e della sorgente termica sono tutti scavati di un canaletto rettangolare, in cui entrando il taglio della riga AB li rende mobili nel verso della sua lunghezza, mentre si possono fermare al punto, che si vuole, mercè viti di pressione.

Apparecchio di Melloni.

417. Il termomoltiplicatore, mentre è l'unico strumento che nelle ricerche sul calore raggiante possa menare a risultamenti di scrupolosa precisione, non è poi abbastanza idoneo ad esser mezzo di dimostrazione per l'uso didascalico. Il discente, che ha sempre visto nei cangiamenti di volume di un corpo termometrico quelli della forza calorifica che li produce, sente bentosto defatigata la sua attenzione, quando per comprendere la ragione dei moti galvanometrici che osserva,

Nostro apparecchio.

il suo pensiero deve continuamente correre dal fatto del deviamento dell' ago a quello dell' azione elettrica che lo produce, e da questo fatto elettrico all' altro dell'azione termica da cui prende origine. Nella necessità di questi ripetuti passaggi, anzichè nella poca appariscenza dei fenomeni, è da riporsi la vera cagione per la quale gli studenti di Fisica di rado si veggono compenetrati dell' alta importanza dei fatti che il termomoltiplicatore ad essi presenta [1]. Di ciò persuaso, ho cercato trasformare il congegno stesso del termomoltiplicatore in un apparecchio atto alle dimostrazioni, sostituendo un sensibile termoscopio alla pila termoelettrica. L' apparecchio, qual mi è stato costruito dall'eccellente meccanico sig. Gargiulo, è rappresentato nella fig. 397. Si vede in A il termoscopio, le cui palle annerite sono preservate da ogni flusso calorifico, estraneo a quello che si vuol esaminare, mercè scatolette cilindriche di forbito ottone in cui son chiuse; e che lateralmente portano innestato un corto tubo dello stesso metallo, il quale mercè conveniente sportellino può immettere od intercettare il flusso calorifero che deve agire sulla palla. Il termoscopio è portato da un disco metallico orizzontale su cui può scorrere in lunghezza, ed il disco è mobile intorno ad un asse fissato ad una riga metallica, la quale dal canto suo può girare orizzontalmente sul pernio che la unisce alla tavola che sostiene tutto l'apparecchio. Così il termoscopio può esser situato in posizioni e distanze assai varie dalla sorgente calorifera, la quale consiste nella fiamma di una lucerna ad olio, o in una spirale di filo di platino fatto incandescente dalla combustione dell'alcool, o in fine in un cubo di latta a facce annerite contenente acqua in ebollizione. I raggi che vengono dalla fiamma dell'olio o dalla spirale incandescente sono riverberati dallo specchietto concavo E, nel cui foco è sita la sorgente calorifera; e di questi raggi riverberati misti a quelli che direttamente vengono dalla stessa sorgente si

[1] Per questa ragione il Melloni non condisceso giammai a voler mostrare i suoi esperimenti a persone, ancorchè di altissima posizione sociale, le quali non avessero potuto comprenderne il valore.

compone il flusso che pei fori, quando sieno aperti, che stanno scolpiti sui parafuochi D e C, giunge libero alla palla termoscopica situata sul suo cammino, o vi perviene dopo aver attraversato qualche corpo diatermico poggiato sulla tavoletta B. La quale, insieme ai parafuochi ed al sostegno della sorgente, può scorrere lungo la base dell'apparecchio.

Mercè questo apparecchio riesce assai agevole dimostrare il moto rettilineo del calore, la sua riverberazione specolare, la sua rifrazione, la diatermasia di parecchi corpi e la loro diversa colorazione pel calore, ed in fine l'eterogeneità dei raggi calorifici delle varie sorgenti termiche e di quelli che provengono da una stessa sorgente.

418. Se attraverso un vetro verde noi ci facciamo a guardare un corpo dello stesso suo colore, il vetro ci sembrerà molto trasparente; ma se pel suo mezzo ci facessimo a guardare un corpo o rosso, o azzurro, ecc. allora ci sembrerebbe presso che opaco. Al contrario una lamina di cristallo bianco ci lascerà vedere i corpi senza veruna dipendenza dal loro colore. Eterogeneità dei raggi calorifici di sorgenti diverse.

Questi fatti, ancorchè i fenomeni del prisma ci fossero del tutto ignoti, basterebbero a dimostrarci — 1.° Che i raggi luminosi, che ci vengono da corpi diversamente colorati, non sono tra essi omogenei, stante che variamente si comportano nel loro incontro con alcuni mezzi traslucidi — 2.° Che questi mezzi riescono bianchi o variamente colorati, sol perchè o fanno indistintamente passare i raggi di qualsiasi colore, o alcuni di questi soltanto.

Or applichiamo questo medesimo criterio ad alcuni fenomeni di trascalescenza scoperti dal Melloni. Questi prendendo ad esame i raggi calorifici che venivano da una lucerna di Locatelli, dal platino incandescente, dal rame riscaldato a 400°, e dall'altro a 100°, trovava:

— 1° Che attraverso una lamina di salgemma, doppia per millimetri 2, 6, passano costantemente 92 centesimi del calore proveniente da una qualunque delle quattro sorgenti.

— 2° Che attraverso tutti gli altri corpi diatermici, ridotti

a lamine della stessa doppiezza di quella di salgemma, passano frazioni del calore incidente che variano colla natura della sorgente. Così lo spato fluore limpido, a modo di esemplo, di 100 raggi calorifici che riceve da ciascuna delle quattro sorgenti, ne trasmette 72 della lucerna di Locatelli ; 69 del platino incandescente ; 42 del rame a 400° ; 33 di quello a 100°.

— 3° Che alcuni corpi, diatermici pei raggi di certe sorgenti, non danno passaggio a quelli di sorgente diversa. Così il vetro e lo spato islandico, perfettamente limpidi, non lascian passare alcuno dei raggi provenienti dal rame a 100°, mentre sono diatermici a diverso grado pei raggi delle altre tre sorgenti.

Comparando questi fatti agli analoghi che presenta la luce, ne risulta necessariamente :

— 1° Che le irradiazioni termiche delle quattro sorgenti sono specificamente diverse, e che in conseguenza il calore, egualmente che la luce, si compone di raggi che in diversa proporzione sono assorbiti dalle varie sostanze diatermiche.

— 2° Che avvi una *colorazione termica* o *termocrosi*, simile a quella che rispetto alla luce esiste in molte sostanze trasparenti ; e che in conseguenza lo spato islandico, il cristallo di rocca, l'allume, il ghiaccio ec. lucidamente bianchi, sono poi *colorati* rispetto al calore raggiante, imperocchè trasmettono in diverse proporzioni i raggi delle diverse sorgenti termiche.

— 3° Che il salgemma, il quale trasmette i raggi delle diverse sorgenti secondo una ragione costante, è *bianco* pel calore, come l'acqua ed il cristallo rispetto alla luce.

E queste illazioni sono rifermate dai fenomeni che i raggi calorifici presentano nella loro successiva trasmissione per diverse sostanze diatermiche. Ed in fatti Melloni ha trovato:

— 1° Che i raggi calorifici, sia che vengano direttamente da una sorgente termica, sia che abbiano già attraversata una lamina di qualunque sostanza diatermica, sono sempre trasmessi dal salgemma nella ragione di 923 a 1000: fenome-

no perfettamente conforme a quello della trasmissione lucida per un cristallo bianco.

— 2° Che le sostanze diatermiche, diverse dal salgemma, trasmettono del calore, che è già passato per una lamina della loro stessa sostanza, una porzione assai più grande che di quello venuto direttamente dalla sorgente. L'allume, a modo di esempio, che trasmette appena 9 centesimi del calore irradiato da una lucerna di Locatelli, trasmette poi 9 decimi dello stesso calore già passato per un'altra lamina dello stesso allume. Dal che poi derivano due importanti conseguenze — 1ª Che il calore inviato dalla sorgente si compone di raggi diversamente trasmissibili per sostanze diatermiche diverse dal salgemma — 2ª Che quelle stesse sostanze si comportano verso il calore raggiante, come i mezzi colorati fanno colla luce bianca.

— 3° Che talune sostanze diatermiche non trasmettono affatto il calore ch'è passato per altre. Così i raggi calorifici, che son passati per una lamina di vetro nero o di mica nera, sono completamente intercettati da una lamina di allume. E non altrimenti avviene della luce rispetto ad alcuni vetri colorati; imperocchè se ci poniamo a guardare attraverso un vetro, che lasci passare i soli raggi verdi dello spettro, accoppiato ad altro vetro che dia passaggio ai soli raggi rossi, noi avremo un buio perfetto.

419. Oltre all'argomento che ne offrivano i fenomeni di successiva trasmissione dei raggi di una stessa sorgente per sostanze diatermiche diverse dal salgemma, Melloni rifermò il concetto della loro eterogeneità, facendo variare la doppiezza della lamina destinata a trasmetterli. Imperocchè, così facendo, la trasmissione dei raggi di ciascuna delle sorgenti sopra indicate avrebbe dovuta presentare delle perdite crescenti colla doppiezza della lamina, se ciascuna di quelle emanazioni calorifere si componesse di raggi omogenei. Le perdite riuscirono al contrario decrescenti, di modo che la ragione del calore trasmesso all'incidente si approssimava a divenire un numero costante, a misura che la lamina era più

Eterogeneità nei flussi calorifici di una stessa sorgente.

doppia. I flussi calorifici dunque emanati da quelle quattro sorgenti, si compongono di raggi specificamente diversi.

Diffusione del calore.

420. La luce, incontrando un corpo opaco la cui superficie non è specolare, ne viene egualmente diffusa in tutte le direzioni ; e se il corpo non è bianco, alcuni elementi soltanto della luce incidente saranno riverberati , gli altri assorbiti. Il calore raggiante presenta fenomeni del tutto consimili.

A dimostrare che i raggi di calore incidenti sulle superficie non specolari ne sono riverberati per ogni verso, Melloni ordinava l'esperimento nel seguente modo. Da un lato del parafuoco metallico *mn* (Fig. 414) verticalmente situato , egli poneva la pila termoscopica *p*, dall'altro la fiamma della lucerna *k*, e ad angolo retto colla direzione del parafuoco giaceva il disco *ab* di noce o di altro legno compatto, e che aveva dipinta di bianco l'una delle facce, e coverta l'altra di un nero vellutato per opera di una larga fiamma fumante. I raggi calorifici inviati dalla fiamma, venivano rifratti da una lente di vetro perchè giungessero leggermente divergenti sulla faccia del disco, e da questo riverberati non arrivavano alla pila se non per lo mezzo di una lamina di vetro. Disposte così le cose, Melloni girava al parafuoco la faccia annerita del disco, e vedeva l'ago rimanersi presso che immobile ; voltavagli al contrario la faccia bianca , e l'ago ne veniva fortemente deviato. E quando la deviazione dell'ago era stabilita, essa rimaneva costante, ancorchè la pila fosse comunque rimossa dalla sua posizione , senza però variare nè la sua distanza dal centro del disco, nè l'inclinazione del suo asse sul piano dello stesso disco. Or i raggi che pervenivano alla pila non erano che raggi riverberati dal disco , imperocchè quelli che potevano risultare dal riscaldamento del medesimo , rimanevano assorbiti dalla lamina di vetro. Quindi si comprende perchè l'ago rimanesse immobile quando alla sorgente termica stava rivolta la faccia nera del disco ; e se nell'altro caso l'ago era deviato, e lo era costantemente nelle diverse posizioni della pila colle condizioni suindicate, fa d'uopo dire che i raggi calorifici, incidenti sulla faccia bianca del disco, n'erano alme-

no in parte riverberati e lo erano egualmente per ogni verso [1].

Nè solamente i corpi adiatermici, ma quelli ancora che sono trasparenti pel calore, ne diffondono i raggi con energia. Allorchè questi corpi sono in lamine ben pulite; il calore n'è riflesso specolarmente; ma se il loro pulito è tolto via sfregandoli con sabbia inumidita o smeriglio, anzichè riflessione speculare se ne avrà diffusione simile a quella prodotta dai corpi adiatermici.

Ed oltre alla diffusione per rimbalzo i corpi diatermici ne producono un'altra nei raggi calorifici trasmessi. Due parafuochi con eguali aperture circolari nei loro centri, si dispongano in due piani paralleli verticali in modo che sia orizzontale la congiungente i centri dei loro fori. Su questa linea si trovino da un lato dei parafuochi la pila termoelettrica, dall'altro la fiamma di una lucerna a livello costante, i cui raggi fatti paralleli da una lente di vetro vadano per lo mezzo dei due fori ad incontrare la faccia attiva della pile. Quando l'ago sarà pervenuto al suo deviamento definitivo, s'introduca tra i parafuochi una lamina pulita di vetro; si vedrà l'ago retrocedere di alquanti gradi sì per l'assorbimento che per la riflessione dei raggi sulle due facce del corpo diatermico, ma troverà bentosto una seconda posizione di equilibrio, dalla quale non sarà rimosso, comunque la lamina si avvicini o si allon-

[1] La scoverta della legge della diffusione, interamente diversa da quella della riflessione speculare, ha messo in chiaro l'errore di taluni metodi di sperimentare, generalmente ricevuti come esatti. Leslie, ad esempio, pensava dimostrare il totale assorbimento dei raggi calorifici incidenti sul nerofumo, sperimentando nel seguente modo. Egli poneva un recipiente di acqua riscaldata innanzi ad uno specchio concavo, nel cui foco stava la palla annerita del suo termoscopio, e vedeva l'indice mettersi in moto; copriva poi lo specchio di nero fumo, e l'indice restava fermo. Per dimostrare la erroneità dell'illazione, Melloni coprì di bianco lo specchio e la palla termoscopica, e sostituendo ai raggi oscuri dell'acqua bollente quelli di una lucerna di Argant con camminetto di vetro, ottenne la stessa immobilità dell'indice. Or dai fatti precedenti sappiamo che i corpi bianchi diffondono con energia le irradiazioni termiche delle fiamme; l'indice dunque restava fermo senza che lo specchio avesse fatto considerevole assorbimento di calore.

tani dal parafuoco prossimo alla pila. Ciò dimostra che se l'interposizione della lamina ha scemata la quantità dei raggi calorifici, non ha mutata la direzione di quelli che l'hanno attraversata. Ma se l'esperimento si ripete con una lamina di vetro spulita, si vedrà l'effetto galvanometrico riuscire più o meno grande, a misura che la lamina sarà più o meno avvicinata al parafuoco che guarda la pila; la qual cosa ci dimostra che i raggi calorifici escono diffusi dal vetro spulito. Nè si può ammettere che l'effetto galvanometrico nella seconda prova sia conseguenza del riscaldamento avvenuto nel vetro spulito, stante che l'interposizione di un vetro levigato tra il parafuoco e la pila se fa retrocedere alquanto l'ago, non lo rimena purtuttavia sullo zero, come dovrebbe avvenire, se i raggi emersi dalla lamina spulita fossero prodotti dal suo riscaldamento.

A completare l'analogia della diffusione termica colla diffusione lucida rimaneva a dimostrare che dei diversi raggi componenti un flusso calorifico alcuni sieno respinti, altri assorbiti dalle superficie non specolari dei corpi adiatermici, vale a dire che il calore riverberato da questi corpi sia in generale *colorato*, del pari che la luce rinviata dalle analoghe superficie dei corpi opachi. Questa colorazione è stata messa fuori dubbio da Melloni nel seguente modo. Egli poneva verticalmente un sottile disco *ab* (Fig. 406) di cartone, isolato e coperto nelle due facce di nerofumo ; e provveduta la pila di riflettore conico, perchè avesse ricevuta gran copia di raggi, ne fermava il sostegno ad una riga orizzontale *ce*, mobile intorno al piede *c* della verticale condotta pel centro del disco. Così la pila, portata all'altezza di questo centro, poteva essere successivamente diretta verso le due facce del disco sotto eguali inclinazioni, *ecn*,*e'cn*. Una delle due facce del disco, e poniamo A, veniva esposta ad una sorgente costante di calore, ed a tale distanza che la pila, diretta sotto un dato angolo verso la faccia B e preservata contro l'azione diretta della sorgente, producesse nell'ago un deviamento di 12° per effetto del calore, che assorbito dalla faccia A, era condotto per la

spessezza del cartone, e poi usciva raggiante dalla faccia B. Ciò fatto, egli sostituiva al disco interamente nero un altro del tutto eguale, ma che aveva bianca la faccia A e nera la B; dirigeva a questa faccia la pila sotto lo stesso angolo che nella prova precedente, indi per un egual angolo la girava verso A, e prendeva nota dei deviamenti definitivi dell'ago nelle due posizioni della pila. Questo doppio modo di sperimento fu attuato usando delle quattro sorgenti qui sotto indicate; e ponendo eguale a 10 la forza calorifica dei raggi emessi dalla faccia nera del disco, trovò che la faccia bianca riverberava in quantità proporzionali ai numeri segnati nella seconda linea della tavola che segue.

SUPERFICIE DEL DISCO AGENTE SUL CORPO TERMOSCOPICO.	SORGENTI DI CALORE RAGGIANTI SUL DISCO.			
	Metallo riscaldato a 400°.	Platino incandescente.	Lucerna di Locatelli.	Raggi della lucerna trasmessi dal vetro.
Posteriore nera.......	10	10	10	10
Anteriore bianca......	14	18	26	64

Da questi numeri si rileva che la faccia bianca del disco ha riverberato in maggior quantità i raggi calorifici delle sorgenti di più alta temperatura; quindi quella faccia, *bianca* per la luce, è riuscita poi *colorata* pel calore.

Un bello esempio di termocrosi di un corpo bianco per la luce, si ha nel seguente fatto scoverto dallo stesso Melloni. Quando la terra è coperta di neve e la temperatura dell'aria sta sotto lo zero, prendasi un tubo presso che eguale a quello della pila termoscopica, e con un setto normale all'asse lo si divida in due cellette eguali, che si empiranno di neve asciutta e caduta di fresco. Indi tra due sorgenti termiche assai diverse, per esempio un vase di acqua bollente ed una lucerna di Argant, pongasi la pila termoscopica in modo che l'indice resti sullo zero per le eguali irradiazioni, da cui saranno colpite

le due facce della pila. Allora sostituiscasi alla pila il tubo pieno di neve, e si vedrà questa liquefarsi celeramente nella celletta rivolta alla sorgente di meno alta temperatura.

Analisi termica dello spettro solare.

421. Le prime ricerche su questo subbietto menarono alla conseguenza che le diverse zone dello spettro avessero diversa temperatura e che il massimo calore risedesse nella zona gialla. Indi Herschell scovriva esistere dei raggi calorifici oscuri oltre il limite del rosso, e presso a questo limite trovava il luogo di massima temperatura. Le sperienze del celebre astronomo erano ripetute da varii fisici con diverso successo, quando Seebeck venne a scovrire che il luogo di massimo calore nello spettro dipende dalla natura della sostanza del prisma, stante che egli lo trovava nella zona gialla con un prisma di acqua, nell'arancia con un prisma di alcool o di acido solforico, e nel rosso estremo con un prisma di crown-glass o di certe specie di flint, mentre con altre specie si aveva fuori del rosso.

Questa scoverta di Seebeck sembrava voler escludere anche la possibilità di un'esatta analisi termica dello spettro solare, quando Melloni ne faceva obbietto di accurate ricerche. Egli cominciò dal verificare che il luogo di massimo calore si trova sul limite del rosso in uno spettro ottenuto mercè un prisma di crown-glass; indi dopo aver esplorate le temperature delle rimanenti sei zone dello spettro, si fece a cercare nella regione occupata dai raggi oscuri altrettante zone che avessero temperature rispettivamente eguali a quelle delle prime. Ciò fatto, interpose sul cammino dei raggi emergenti dal prisma uno strato di acqua, che chiuso tra due vetri paralleli era doppio circa due linee; ed allora tornando ad esaminare le temperature delle sei zone oscure e delle sei luminose, le trovò assai diverse da quel che erano. Il calore delle zone oscure di egual temperatura della violetta, della turchina e dell'azzurra, più non esisteva; e la perdita riusciva nelle altre sempre più piccola, fino a sparire del tutto nella zona gialla. Perciò il luogo del massimo calore doveva esser passato verso le zone dei raggi più rifrangibili, ed infatti si tro-

vava nella zona gialla. Così l'eterogeneità dei raggi calorifici dello spettro solare veniva dimostrata dal diverso assorbimento che patiscono nell'attraversare una medesima sostanza; e si ebbe così il primo fenomeno di termocrosi scoverto da Melloni.

Questo fatto, che si trovava in aperta contraddizione colle idee teoretiche di quel tempo sulla natura del calore raggiante, indusse il Melloni ad esplorare la trasmissione dei raggi calorifici di varie sorgenti per diverse sostanze diatermiche; e così ebbe a scoprire nel salgemma la preziosa qualità di trasmettere egualmente i raggi calorifici di qualsiasi natura.

Or se questo corpo è il solo mezzo che sia bianco pel calore, e gli altri corpi diafani, bianchi rispetto alla luce, sono poi più o meno colorati rispetto al calore, ne seguiva necessariamente che l'analisi termica dello spettro ottenuto con un prisma di sostanza diversa dal salgemma, dovesse avere lo stesso valore logico che l'analisi lucida di uno spettro prodotto con un prisma di vetro colorato. L'analisi dunque del calore nello spettro solare richiedeva che questo fosse prodotto da un prisma di salgemma. Melloni menò ad effetto questa capitale sperienza, ed ebbe che il massimo calore nello spettro ha luogo nei raggi oscuri che distano dal limite del rosso per quanto questo limite dista da quello del giallo.

Ottenuto così lo *spettro calorifero normale*, Melloni interpose sul cammino dei raggi emergenti dal prisma di salgemma or una lamina di crown, or una di flint ed ora uno strato di acqua, e vide riprodotti i fenomeni termici che si erano osservati negli spettri prodotti con analoghe sostanze.

Nè alla sola colorazione termica delle sostanze dei prismi debbono attribuirsi le divergenze dei risultamenti ottenuti dai fisici sulla distribuzione dei raggi calorifici nello spettro solare, imperocchè Melloni ha trovato che una maggiore o minore spessezza nel fascio di raggi che colpiscono il prisma, ed il diametro più o meno grande del corpo termoscopico influiscono sulla determinazione del luogo di massimo calore.

Del che si comprenderà facilmente la ragione, se si consideri che ogni falda di raggi parallela allo spigolo dell'angolo rifrangente del prisma produce uno spettro, e che la temperatura data dal termoscopio non è che la media delle temperature prodotte dalle diverse falde di raggi calorifici, donde è colpito.

Ed all'occasione di queste ricerche sull'ordinamento calorifero dello spettro Melloni scovriva che l'aria in grandi masse è colorata pel calore egualmente che per la luce. Ed in vero egli trovava in giorni egualmente sereni la zona più calda dello spettro or più vicina or più lontana dal limite dei raggi rossi meno rifrangibili. La qual cosa non può attribuirsi a mutazione di trasparenza, imperocchè questa poteva cangiare il valore e non il sito del massimo. Il fenomeno evidentemente era prodotto dall'essere alcuni raggi calorifici assorbiti in maggior quantità degli altri; nè la variabilità della termocrosi atmosferica può destar meraviglia, qualora si conderi la variabilità dei suoi elementi.

Teoria del calore raggiante.

422. La dottrina del calore raggiante è successivamente passata dal sistema dell'emissione a quello delle onde.

Nel sistema dell'emissione il sole e tutte le sorgenti termiche luminose c'inviano delle molecole calorifiche, di cui alcune agirebbero soltanto sul senso del tatto, mentre delle altre ecciterebbero ancora il senso della vista. Supporre che non vi siano che molecole di calore oscuro, e che in conseguenza la luce ed il calore sieno due sostanze diverse, sarebbe lo stesso che piantare un'ipotesi contradditoria ai principii del sistema. Ed invero, i raggi caloriferi, compagni degli elementi prismatici della luce solare, dovrebbero in questa ipotesi esser prodotti da molecole di calore oscuro egualmente rifrangibili che le molecole luminose cui vanno unite; vale a dire da molecole di calore che hanno per la materia del prisma un'attrazione eguale a quella che ne ricevono alcune molecole luminose. Ma l'eguaglianza dell'attrazione non essendo concepibile senza l'identità della sostanza, è chiaro come l'eterogeneità di quelle due categorie di molecole sia in aperta contraddizione ai principii del sistema.

Nel sistema poi delle onde, essendochè la sola diversità delle loro lunghezze è quella che produce la varia rifrangibilità dei raggi, oscuri o luminosi che sieno, è chiaro che le onde calorifere egualmente rifrangibili che le onde luminose debbono avere con queste una medesima lunghezza, e quindi costituire una sola e medesima onda.

Non è dunque possibile, sì nell'uno che nell'altro sistema, ammettere l'esistenza di luce scompagnata da effetti calorifici. E se contro questa illazione si citava il fatto della luce lunare, che concentrata dalle più forti lenti ustorie non valeva a scuotere i più sensibili termoscopii, si vedeva chiaro come una tale obbiezione non potesse avere alcun valore logico, stante che una lente più forte o un termoscopio più sensibile avrebbe potuto torla di mezzo. Ed in fatti Melloni, concentrando sulla pila termoscopica la luce lunare mercè una lente a scaglioni di un metro di diametro, n'ebbe pel verso di accresciuto calore un deviamento galvanometrico che giunse talvolta a 4°,8.

Nè di miglior forza sarebbe l'argomento che contro l'unità del principio luminoso e calorifero si volesse per avventura trarre dal fatto che i raggi più caldi dello spettro non sono i più lucidi, nè i più efficaci ad azione chimica; imperocchè queste due ultime potenze dell'irradiazione solare si risolvono in fatti di risonanza, che nulla dicono sul valore assoluto dell'azione che li produce. Ed in vero se i raggi gialli hanno maggior forza d'illuminare, ciò dipende dall'analogo colore della retina; e le fiamme, cominciando con luce violacea o turchina per quindi passare al giallo chiaro, ci dimostrano che per la produzione degli effetti chimici si richieggono onde eteree assai corte, a fin di eccitare nella materia ponderabile quel movimento intestino necessario alle nuove combinazioni atomiche, e che in conseguenza i raggi più atti alla produzione di questo moto debbono trovarsi tra i più rifrangibili dello spettro.

Ammessa l'unità del principio calorifero e luminoso, necessariamente i fenomeni dell'irradiazione termica vanno con-

siderati nel sistema delle onde, che solo si accórda con tutti i fenomeni dell'azione lucida. E questa illazione è rifermata dai seguenti fatti scoverti da Melloni e da lui citati quali prove di eterogeneità dei raggi calorifici, ma che realmente non sono che altrettante contraddizioni pel sistema dell'emissione.

— 1°. Se quando il cielo è sereno e la terra è coverta di neve, si sospenda orizzontalmente ed a piccola distanza dal suolo un'assicella di legno dipinta di nero, ed ivi si lasci per qualcuna delle ore prossime al meriggio, si troverà la neve fusa in maggior copia sotto l'ombra proiettata dall'assicella, che nei luoghi adiacenti, liberamente esposti all'azione solare.

— 2°. Essendo la temperatura dell'aria inferiore a zero, si riempia di neve asciutta e di fresco caduta un largo recipiente, e spianatane la superficie con una riga, la si ponga verticalmente; innanzi a questa ed a piccola distanza dal suo centro si sospenda parallelamente ad essa un piccolo disco di carta bianca, e gli si avvicini una lucerna di Argant, i cui raggi sieno costretti a passare per una doppia lamina di vetro, prima che vadano ad incontrare la superficie della neve e quella del disco. Allora si vedrà la neve fondersi in maggior quantità all'ombra del disco, ivi producendosi una sensibile cavità.

Come sopra dicevamo, questi fatti sono stati messi innanzi dal Melloni quali prove dell'eterogeneità dei raggi calorifici; ma egli è facile vedere che la sola eterogeneità dei raggi non basta a dichiararli. Ed in vero, se i raggi che hanno resa più celere la fusione della neve nei luoghi protetti dall'ombra dell'assicella nel 1° esperimento e da quella del disco di carta nel secondo, avessero formata una parte dell'irradiazione incidente, di necessità la neve avrebbe dovuto riceverne maggior numero nei luoghi liberamente esposti alla loro azione, ed ivi fondersi in copia maggiore. Quei raggi dunque non esistevano, almeno in parte, nell'irradiazione incidente; e questo fatto, che nel sistema delle onde trova un esatto riscontro nel campanello di Savart, sarebbe poi un assurdo nel sistema dell'emissione, imperocchè menerebbe necessariamente a do-

ver ammettere che una certa quantità di molecole calorifere fosse creata dall'assicella di legno e dal disco di carta.

Ed una volta ammesso che il calore proceda per onde al pari della luce, si comprenderà facilmente come nello stesso etere, in cui hanno luogo le onde, lucide ad un tempo e calorifere, della porzione visibile dello spettro, possano generarsi ancora e quelle che ci danno i raggi di calore oscuro oltre il rosso estremo , e le altre che produttrici di sola azione chimica, si trovano al di là dell'ultimo violetto. Queste due classi di onde eteree riuscirebbero insensibili per l'occhio, non altrimenti che per l'orecchio avviene di alcuni suoni troppo gravi o troppo acuti.

LIBRO NONO.

METEOROLOGIA.

CAPO PRIMO.

OBBIETTO DI QUESTO LIBRO.

423. La Meteorologia, in quanto che descrive tutti i fenomeni fisici osservati in seno all'atmosfera, è parte integrante della Cosmografia; e sotto questo riflesso si occupa egualmente e dei fenomeni che la scienza sa collegare alle loro cagioni, e di quelli che fanno tuttavia desiderare una spiegazione soddisfacente.

Ma la Meteorologia può essere guardata per un aspetto puramente didattico, e pel quale essa diviene necessario complemento di una Istituzione Fisica. Una necessità di metodo obbliga lo studioso ad apparare le leggi delle diverse categorie di fenomeni, come se le forze che li producono, esistessero isolatamente nella natura delle cose; così noi studiamo le leggi della gravità, del calore, ecc. come se i corpi fossero o soltanto pesanti, o soltanto caldi, ecc. Nè può farsi altrimenti attesa la natura del nostro spirito. Ma se tale astrazione è indispensabile per comprendere gli elementi della scienza, questa non in altro può consistere che nella sintesi dei suoi elementi, qual ce la offre il naturale ordinamento delle cose. L'attuazione di questa sintesi è appunto l'obbietto dei trattati di Meteorologia, con cui si compiono presso che tutte le Istituzioni di Fisica; e poichè essi son destinati a chiarire come i diversi agenti naturali concorrono alla produzione dei di-

versi fenomeni, così non potrà esservi discorso di fatti meteorologici, la cui spiegazione ancor non sia accertata. Questi trattati, in somma, hanno colle pure Istituzioni di Fisica quella stessa ragione che corre tra le Istituzioni matematiche e le esercitazioni, che vi si aggiungono, sulle teoriche in esse contenute.

CAPO SECONDO.

DELL'ATMOSFERA E DE'VENTI.

424. Il fluido che per tutto involve il nostro globo, e che diciamo *atmosfera*, si compone dell'*aria* propriamente detta, e di tutto ciò che sotto forma gassosa esala dalla superficie della terra, come il vapore acqueo, l'acido carbonico risultante dalle combustioni e dalla respirazione degli animali, e le diverse esalazioni prodotte dalle funzioni vitali degli esseri organici e dalla loro putrefazione dopo la morte. Composizione dell'atmosfera.

L'aria non è che una mescolanza di due fluidi diversi, denominati *ossigeno* ed *azoto*, e che l'uno indipendentemente dall'altro si diffondono intorno al globo. Da ciò deriva che la ragione, 1 di ossigeno e 4 di azoto, con cui formano un dato volume di aria, sia riuscita costante e per quella raccolta sulle vette dei monti o in più alte regioni dell'atmosfera dagli aeronauti, e per quella tolta dalle basse valli od anche dalla superficie delle maremme e dalle sale degli ospedali. Quindi è che la sua varia salubrità in diverse contrade non potrà da altro dipendere che da sostanze in essa sospese.

425. L'equilibrio atmosferico non può risultare che dall'opposta azione della gravità che ne sollecita le molecole verso il centro della terra, e dell'espansibilità propria di ogni corpo gassoso e che tende viceversa a disperderle nello spazio. Per l'azione contraria di queste forze si produce nell'aria una densità e quindi una tensione decrescente secondo una certa leg- Definizione, direzione ed intensità dei venti.

ge dal basso in alto, ed uniforme nelle falde parallele alla superficie terrestre. Or se un cangiamento di temperatura, o qualsiasi altra cagione, distrugga in qualche punto dell'atmosfera l'uniformità della tensione orizzontale, o ne venga ad alterare la legge di decremento in altezza, ivi l'equilibrio verrà meno, e vi sarà produzione di vento nel moto che ne risulta.

Dei venti si distinguono le intensità e le direzioni. L'intensità, come proporzionale al cammino fatto dalla colonna di aria in un dato tempo, è misurata dalla velocità stessa del vento, la quale può variare tra limiti assai estesi. Così mentre l'aura leggiera che appena scuote le foglie delle piante, non giunge a percorrere un miglio geografico all'ora, l'uragano che schianta gli alberi ed abbatte gli edifizii, ne fa meglio che ottanta.

Gli apparecchi destinati alla misura della velocità del vento, si dicono *anemometri*. Tal'è per esempio, l'*ala di vento* di Woltmann, la quale si compone di una banderuola mobile intorno ad un asse verticale, e che seco ne porta una orizzontale, intorno a cui sono girevoli due piccole ali a modo di quelle di un mulino a vento. Così la corrente di aria dopo aver fatta la banderuola parallela alla sua direzione, spinge con tutta la sua forza le ali del molinello, e dal numero dei loro giri, dato da un indice che per mezzo di ruote dentate e di una vite perpetua vi è congiunto, l'osservatore deduce la velocità del vento.

La direzione poi del vento, nelle regioni dell'atmosfera accessibili alle indicazioni degli strumenti, è data dagli *anemoscopii*, che consistono in una mobilissima banderuola che porta un indice scorrevole sulla circonferenza di un cerchio graduato; e nelle alte regioni il cammino delle nuvole segna quello del vento.

I nomi speciali destinati ad indicare le diverse direzioni dei venti, sono quelli dei punti dell'orizzonte, donde vengono all'osservatore; così diciamo *vento di nord*, *vento di sud*, ecc. il vento che ci viene dal nord, quello che spira dal

sud, ecc. Ed oltre alle quattro direzioni corrispondenti ai quattro punti cardinali, se ne hanno le intermedie nel seguente modo. Dopo aver tirato in un cerchio due diametri ad angolo retto, per segnare le linee *nord-sud*, ed *est-ovest*, nei cui estremi stanno i punti di partenza dei quattro venti principali, divideremo i quattro angoli per metà ed avremo quattro direzioni di venti intermedii ai primi, distinte coi nomi *nord-est, nord-ovest, sud-est, sud-ovest*. Si dividano ancora per metà gli archi compresi tra queste otto direzioni definite, e se ne avranno altre otto, distinte coi nomi *nord-nord-est, est-nord-est, est-sud-est*, ecc. i quali si formano unendo degli otto primi venti i nomi dei due in mezzo a cui giace la nuova direzione. Bisecando infine gli archi compresi tra le 16 direzioni già definite, se ne avranno altre 16, distinte coi nomi *nord-nord-est-$\frac{1}{4}$ est*, *nord-nord-est-$\frac{1}{4}$ nord*, ecc. le quali completano il numero di 32 direzioni, sufficienti a definire la proiezione orizzontale del cammino di qualsiasi vento.

426. Abbiamo qui sopra detto, che qualunque cagione venisse a turbare l'uniformità della tensione orizzontale o la legge di decremento nella tensione verticale, in qualunque punto della massa atmosferica, essa vi produrrebbe disquilibrio ed in conseguenza vento. Or di simili cagioni la scienza non conosce che due sole: la rapida trasformazione delle nubi in pioggia, ed i cangiamenti di temperatura. Cagioni dei venti.

Quando il vapore acqueo costituente le nubi rapidamente si trasforma in liquido, si produce in seno all'atmosfera un voto che l'aria ambiente corre a riparare con una velocità proporzionale alla perdita di tensione che n'è avvenuta; e da ciò derivano quei forti colpi di vento che sogliono accompagnare le pioggie dirotte, e che frequenti si osservano nella stagione piovosa delle regioni tropicali.

Analogamente, ma in modo lento e continuo, agiscono ancora i cangiamenti di temperatura che si compiono in qualche punto dell'atmosfera. Poniamo a modo di esempio che la contrada AB (Fig. 416) divenga più calda delle sue contigue AD e BC; per questo aumento di temperatura l'aria sovrap-

posta ad AB, espandendosi, si eleverà in MN superando l'antico livello PQ, e di, là riversandosi sulle colonne atmosferiche sovrastanti alle regioni DA e BC, produrrà un vento diretto dal luogo caldo al freddo. E mentre ciò succede nelle alte regioni dell'atmosfera, nelle basse poi dovrà aver luogo un vento diretto viceversa dai luoghi circonvicini freddi al luogo caldo, e prodotto dall'aria corrente a riparare il voto che per espansione è avvenuto nella colonna sovrastante ad AB. E queste illazioni che necessariamente derivano dalle condizioni che vogliono esser soddisfatte per l'equilibrio di un fluido elastico, si trovano rifermate da un facile sperimento dovuto a Francklin. Se d'inverno stando acceso il fuoco in una stanza, schiudasi alquanto la sua porta di comunicazione con altra stanza che rimane tuttavia fredda, ed in quest'apertura pongasi una candela accesa, si vedrà la fiamma inclinarsi verso la stanza calda o verso la fredda, secondochè la candela sarà portata verso il suolo o verso la sommità dell'uscio. Questa diversa inclinazione della fiamma ci dimostra come l'aria rarefatta nella stanza calda si espanda per l'alto, e come l'altra radendo il suolo venga dalla stanza fredda a riempiere il voto.

Mediante queste considerazioni si viene facilmente a poter dichiarare i seguenti fenomeni meteorologici.

Brezze di mare e di terra.

427. Quando l'aria di un paese marittimo è abbastanza calma, ivi si vedrà circa le ore nove del mattino levarsi un vento dal mare, che acquistando vigore a poco a poco toccherà un massimo verso le ore tre della sera; indi scemando continuamente cesserà del tutto dopo il tramonto del sole, e darà luogo ad un opposto vento di terra, che correndo le stesse fasi giungerà alla massima energia verso il sorgere del nuovo sole.

Il primo di questi due venti periodici si nomina *brezza di mare*, l'altro *brezza di terra*. La ragione del loro essere apparirà chiara per le cose anzidette, sol che si ponga mente al fatto che la superficie terrestre sotto l'azione diretta dei raggi solari si riscalda più che quella del mare, e che durante la notte la prima diviene viceversa più fredda della seconda. Quin-

di vi sarà calma, quando nel mattino per l'azione crescente dei raggi solari la superficie terrestre diviene egualmente calda che quella del mare. A contare da questo momento, che si raggiunge verso le ore nove, la prima superficie superando in temperatura sempre più la seconda, l'aria ne ascenderà in maggior copia, e quella sovrastante al mare accorrendo a ripianare il voto così prodotto, darà cominciamento alla brezza dello stesso nome. La quale necessariamente dovrà crescere di forza come andrà crescendo la differenza di temperatura tra le due superficie; e quando una tal differenza, dopo aver toccato un massimo nelle ore pomeridiane, scemando sempre tornerà di bel nuovo ad essar nulla, allora avverrà una seconda calma, che sarà poi seguita dall'opposta brezza di terra; imperocchè questa divenendo sempre più fredda della superficie del mare, l'aria dovrà venire dalla prima a riempiere il voto che una più celere ascensione produrrà sulla seconda.

428. La stessa cagione, da cui derivano le brezze, variamente dirette a norma della diversa orientazione del lido, è poi quella che agendo sull'intera massa atmosferica produce l'*aliseo*, ossia il vento costante di est sotto la zona dei tropici, e che riempì di spavento i compagni di Colombo alla scoverta del Nuovo Mondo, perchè loro toglieva financo la speranza di un ritorno in patria. Venti alisei.

La zona torrida rispetto alle temperate, e queste riguardo alle glaciali, sono tra loro come la stanza calda è alla fredda nell'esperimento di Francklin. Quindi delle correnti di aria dovranno per le regioni superiori dell'atmosfera movere dall'equatore verso i poli, mentre da questi al primo due opposte correnti procederanno radendo la superficie del suolo; e perciò se la terra non avesse moto di rotazione, in ciascun emisfero si avrebbe un vento omonimo al suo polo nelle basse regioni, e nell'alto un vento perfettamente opposto.

Ma la terra giornalmente compie la sua rotazione da occidente in oriente, producendo in ogni punto della sua superficie un'effettiva velocità proporzionale al raggio del rispettivo parallelo. Perciò l'aria che move dai poli all'equatore, trova

nei diversi paralleli, che incontra, una celerità maggiore della sua; quindi resta indietro, ed urtata dall'osservatore e dalle varie prominenze del suolo, produce lo stesso effetto di un vento diametralmente opposto combinato con quello che viene dal polo. Si avrà dunque un vento di nord-est nell'emisfero boreale, ed un altro di sud-ovest nell'australe; e questi due venti urtandosi a vicenda nella regione equatoriale debbono ivi necessariamente produrre vento di est, che d'altronde è molto debole, stante che la celere ascensione, prodotta nell'aria dal forte riscaldamento del suolo, assorbe col suo moto verticale presso che tutta la velocità orizzontale dell'aliseo. La zona in cui ciò succede, costituisce la *regione delle calme* la quale, attesa la diversa configurazione dei continenti, non coincide colla linea equinoziale, ma giace a borea di essa.

Or se tanto avviene dell'aria che radendo il suolo giunge all'equatore, l'altra che viceversa da questo si riversa su i poli, dovrà nella stessa regione dei tropici produrre un vento costante di ovest. Ed infatti i viaggiatori lo trovarono sul Picco di Teneriffa mentre sul mare sottoposto spirava il vento di est, e le ceneri lanciate dai vulcani della regione tropicale si son viste cadere su punti che ne stanno a levante.

Mussoni ed etesii. 429. I *mussoni* nel Golfo delle Indie (dal malese *moussin* che significa *stagione*), gli *etesii* degli antichi (dal greco *etos* che suona *anno*), dipendono dalla stessa cagione che produce le brezze e gli alisei.

Nella parte meridionale del Mar delle Indie regna tutto l'anno l'aliseo sud-est; ma nella parte settentrionale che forma il golfo, avviene che in vece dell'ordinario aliseo, si abbia d'inverno un vento di nord-est, e di estate un vento di sud-ovest. Questi venti, detti *mussoni*, non sono che l'aliseo stesso, modificato dalla presenza del rialto centrale del Thibet e della catena dell'Himalaja da un lato, e delle aride pianure della Persia e dell'Arabia dall'altro.

I venti poi, che gli antichi denominarono *etesii*, regnano periodicamente sulle coste africane bagnate dal Mediterraneo. Le sabbie dell'immenso Sahara, fortemente riscaldanti duran-

te l'estate, fanno che l'aria vi accorra dal mare, producendo su quelle coste un vento di nord; che poi si muta in vento di sud, quando nel raffreddamento invernale l'aria è costretta di movere dal continente al mare.

430. Quantunque i cangiamenti che avvengono nelle direzioni dei venti che spirano fuori la zona dei tropici, a prima vista non sembrassero sottoposti ad alcuna regola, purtuttavia diligenti osservatori han trovato che sul nostro emisfero i venti d'ordinario si succedono nell'ordine seguente: Legge della rotazione dei venti.

S,SO,O,NO,N,NE,E,SE,S.

Vale a dire che il vento suol passare da Sud a Nord toccando Ovest, e per Est poi ritorna da Nord a Sud.

Nell'altro emisfero il periodo segue la via opposta; la qual cosa ci dichiara che la legge di rotazione dei venti debba essere una conseguenza del moto assoluto generato nell'aria dall'azione solare e dalla liquefazione del vapore acqueo, e del moto relativo che vi apporta il giro diurno del nostro pianeta.

CAPO TERZO.

TEMPERATURA DELL'ATMOSFERA.

431. Il sole levandosi sul nostro orizzonte, ci porta colla luce il calore, il quale dovendo al par dell'altra variare come il seno (n° 319) dell'angolo d'inclinazione dei raggi sul piano dell'orizzonte, sarà crescente dal nascere al meriggio, e decrescente da questo al tramonto. Variazioni diurne ed annue.

Gran parte intanto di questo calore solare va disperso per mezzo d'irradiazione dalla superficie terrestre, la quale come quella di ogni altro corpo più caldo dello spazio ambiente, emetterà tanta maggior copia di raggi per quanto più elevata ne sarà la temperatura. E poichè i raggi emessi non sono che una frazione dei raggi incidenti, così la massima temperatura

della superficie terrestre non avverrà nell'istante della massima azione solare, ma qualche ora dopo, e propriamente quando quest'azione, sempre decrescendo, sarà giunta a pareggiare la celerità dell'irradiazione terrestre. A contare da un tale istante la temperatura andrà sempre diminuendo fino a toccare un minimo nel momento del nuovo sorgere del sole.

Oltre al periodo di variazione diurna la temperatura della superficie terrestre ne presenta un altro di variazione annua, dipendente dalla varia obbliquità dei raggi secondo la diversa altezza meridiana del sole, e dalla varia durata dell'astro sul nostro orizzonte. Ed in vero l'azione solare riesce massima nel giorno del solstizio di estate, perchè massima è la sua durata sull'orizzonte, e l'obbliquità dei suoi raggi è minima; al contrario questa nel solstizio d'inverno giunge al suo massimo valore, mentre la durata dell'azione tocca il suo minimo. E siccome nei cangiamenti diurni della temperatura terrestre l'ora del massimo caldo è posteriore a quella del meriggio, così ancora nei cangiamenti annui della stessa temperatura avviene che il giorno di massimo freddo non sia quello del solstizio d'inverno, nè il giorno del solstizio estivo sia quello di massimo caldo.

A contatto del suolo sta l'aria, che essendo diatermica non può esser riscaldata nè dai raggi che vengono dal sole, ne da quelli che la superficie terrestre emette nello spazio. Il calore dalla terra si comunica all'aria soprapposta non altrimenti che da una caldaia all'acqua che vi è contenuta, vale a dire che la prima falda di aria riceve il calore dal suolo che tocca, si dilata e quindi si eleva per dar luogo ad una seconda falda; a questa similmente succederà una terza falda, indi una quarta, e così di seguito. E poichè queste trasmissioni di calore debbono avere una certa ragione di quantità coll'eccesso termico della terra sull'aria, così si comprende come le diverse fasi di temperatura della superficie terrestre vadano riprodotte nell'aria che sopra vi poggia.

Evvi pertanto una notevole differenza tra il modo di riscaldamento di un liquido e quello di un corpo aeriforme libero

di espandere il suo volume. Le falde liquide che salgono dal fondo riscaldato di un recipiente, non perdono nel loro tragitto altra quantità di calore, fuorchè quella che va trasfusa nelle falde più fredde con cui s'incontrano, e che non può esser considerevole attesa la debole conducibilità termica di questi corpi. Al contrario la falda di aria che si alza dal suolo riscaldato dai raggi solari, si espande come va più in alto, perchè minor pressione riceve da quella che le sta sopra; e coll'espandersi accresce la sua capacità termica e rapidamente si raffredda. Quindi si comprende come avvenga che le diverse falde atmosferiche, concentriche alla superficie terrestre abbiano una temperatura decrescente, a misura che si trovano più lontane dal suolo; e come il calore che da questo in quelle si trasfonde, non possa pervenire neanche in minima quantità a certe date altezze nella massa atmosferica, nelle quali dovrà necessariamente aver luogo una stessa temperatura sì di giorno che di notte, sì di estate che d'inverno.

Nè la sola capacità termica, crescente nelle falde di aria a misura che salgono più in alto, è quella che consuma gran parte del calore ad esse comunicato dalla superficie terrestre, ma l'irradiazione ancora che le falde inferiori, attesa la diatermasia della massa, possono attuare attraverso le superiori, accresce il raffreddamento dell'aria. Così avviene che il calore da essa guadagnato durante la primavera e l'estate, va poi disperso durante l'autunno e l'inverno, non ostante che la sua conducibilità sia presso che nulla. Dal che poi deriva che comparando le temperature dei diversi giorni di primavera a quelle dei giorni di autunno di egual durata del sole sull'orizzonte si trova che le prime, date le altre cose eguali, son sempre minori delle seconde.

432. Se l'azione solare è la stessa su tutti i punti di un parallelo, non vi produce pertanto una stessa temperatura diurna ed annua. Or per definire ciò che si debba intendere per temperatura diurna ed annua di un luogo, mentre conosciamo che il grado di calore è vario da un istante all'altro del giorno e da un giorno all'altro dell'anno, immaginiamo che

Isoterme, isochimene, isotere.

un termometro sia fermato ad un sostegno sporgente da una finestra che guardi il settentrione, e che dirimpetto non abbia edifizio od altra prominenza da cui possano venirle riverberati i raggi del sole ; e che in fine il termometro sia osservato di ora in ora [1]. La media delle 24 osservazioni così fatte darà la *temperatura diurna*; quella di un mese sarà data dalla media delle 30 temperature diurne corrispondenti, ed in fine la media delle dodici temperature mensuali darà quella dell' anno.

Or immaginiamo una linea condotta per tutti i punti della superficie terrestre, pei quali siasi ottenuta una stessa temperatura annua, quella linea è l'*isoterma* (linea di egual calore) corrispondente a quella data temperatura. Così si hanno le isoterme di 0°,5°,10°, ecc.

Ma la media annua non è sufficiente a dare una giusta idea della distribuzione del calore per un dato clima. Ed in vero poniamo che per un dato paese si ottenesse la temperatura media —4° pei mesi da Novembre a tutto Aprile, e +16° da Maggio ad Ottobre; la media annua ivi sarebbe $\frac{16-4}{2}=6°$. Or se per un altro paese si avesse la media invernale 0° e la estiva 12°, la media annuale di questo secondo paese riuscirebbe eguale a quella del primo, quantunque l'inverno ivi fosse meno rigido e la state meno calda. Quindi si comprende come con una diversa temperatura annua vi sieno paesi che abbiano inverni egualmente freddi, ovvero estati egualmente calde. Le linee congiungenti i luoghi di egual freddo

[1] Uno dei primi che menassero ad effetto il sistema delle osservazioni orarie, fu Chiminello in Padova, il quale per sedici mesi osservò il termometro di ora in ora dalle 4 del mattino alle 11 della sera, intercalandovi sempre un'osservazione fatta nel rimanente della notte ad ora diversa per meglio conoscere l'andamento della temperatura notturna. Più tardi, e propriamente negli anni 1824 e 25, dietro invito di Brewster furono fatte delle osservazioni orarie nel forte di Leith presso Edimburgo per opera dei bassi uffiziali incaricati dello scambio delle sentinelle ; e questo sistema fu poi adottato in Russia. Ma il meteorologista preferirà sempre l'uso di strumenti che seguino da loro stessi le variazioni che si vogliono studiare.

invernale si dicono *isochimene*, ed *isotere* quelle che uniscono luoghi di egual calore estivo.

433. La conoscenza del massimo freddo invernale e del massimo calore estivo di una contrada è un dato di sommo interesse che la Meteorologia può somministrare all'Agricoltura. E speciali termometri sono stati inventati per la determinazione di queste temperature estreme.

Temperature massime e minime.

Uno dei più semplici è quello di Rutherfort, che si vede rappresentato nella fig. 418. Si compone di un termometro AB a mercurio e di un altro CD ad alcool, fermati orizzontalmente ad una tavoletta su cui stanno segnate le loro scale. Nel cannello del primo termometro sta un cilindretto di acciaio di qualche linea di lunghezza, che si fa cadere sulla colonna di mercurio inclinando dolcemente il termometro dal lato del serbatoio. Quando la temperatura si aumenta, l'indice è spinto innanzi dallo allungamento della colonna mercuriale, e l'osservatore dopo un tempo qualunque lo troverà nel luogo ove il liquido lo avrà lasciato nella sua massima espansione ; così sarà conosciuta la temperatura massima avvenuta in quel periodo di tempo. Il termometro ad alcool è poi destinato ad indicare la minima temperatura, ed all'uopo vi sta immerso nel liquido un piccolo cilindro di smalto. Quando il liquido si dilata, il cilindro resta nel luogo che occupava ; ma se il liquido si contrae, il cilindro che supponiamo a contatto colla sommità della colonna, sarà trascinato per lo stesso verso dalla forza capillare della superficie di livello, per esser poi lasciato nel luogo corrispondente alla massima contrazione della colonna liquida, e così farà noto il grado del massimo freddo avvenuto dopo l'ultima osservazione.

I termometri a massimo e minimo attaccati ad un globo aerostatico, la cui ascensione a piacere si possa arrestare per mezzo di una fune, ci faranno conoscere la temperatura dell'aria a diverse altezze sul punto di osservazione ; e potranno ancora darci la temperatura del mare o di un pozzo artesiano a diverse profondità, qualora vi scendano chiusi in un tubo abbastanza forte. Ma bisognava che l' istrumento

avesse avuta una forma conveniente all'uopo, e tale ne sembra quella del *termometrografo*. Il quale si compone di un serbatoio AB (Fig. 419) in cristallo, a cui è saldato il tubo CDL della medesima sostanza. La porzione DL del tubo è piena di mercurio, il serbatoio e ciò che rimane del tubo sono riempiti di alcool. In questo liquido stanno immersi gl'indici v e v', che sono dei sottili cilindri di acciaio coperti di vetro, i quali per mezzo di piccoli anelli elastici restano sospesi nell'alcool al punto in cui vengono portati dai movimenti della colonna di mercurio. Al momento di voler usare dell'istrumento fa di uopo che gl'indici sieno a contatto delle due sommità della colonna di mercurio, la qual cosa facilmente si ottiene per opera di una piccola calamita. Se dopo ciò il termometro soffra diminuzione di temperatura, allora la contrazione dell'alcool nel serbatoio farà salire l'estremità D della colonna di mercurio, e con essa l'indice v; e se viceversa succedesse un aumento di temperatura, salirebbe allora l'indice v'. Sì nell'uno che nell'altro caso l'osservatore conoscerà non solamente se sia avvenuto un cangiamento di temperatura in più o in meno, ma potrà definirne ancora la quantità per mezzo della differenza di altezza dei due indici.

Luogo delle variazioni diurne ed annue.

434. Sappiamo che l'aria ben poco assorbe del calore che le invia il sole, e che quello che essa toglie dalla superficie terrestre per mezzo di correnti ascendenti, va spegnendosi a misura che si va più in alto. Quindi è che la sua temperatura si trova più bassa come più in alto si ascende, e nel medesimo verso si ha una differenza sempre più piccola tra il grado termometrico del giorno e quello della notte. Vi sarà dunque una altezza in cui questa differenza risulterà nulla, ed ivi spariranno le variazioni diurne ed annue della temperatura dell'aria. Or la linea delle nevi perpetue che nella zona stessa dei tropici non si eleva più che 4800 metri sul livello del mare, ci dimostra che la regione in cui cesseranno di aver luogo le variazioni termometriche non debba esser lontana dalla superficie terrestre che di una piccola frazione del suo raggio.

D'altronde l'imperfetta conducibilità delle sostanze componenti la crosta del nostro pianeta, fa che il calore comunicato dal sole alla sua superficie non possa estendersi molto nello interno; ed in fatti le ricerche istituite coll'immergere dei lunghi termometri a diverse profondità, hanno mostrato che ad un metro circa sotto la superficie del suolo spariscono le variazioni diurne, e che alla profondità di circa 30 metri la temperatura è costante in tutte le stagioni dell'anno.

Quindi è che l'estremo calore estivo e l'estremo freddo invernale, che potremmo forse figurarci come indefinitamente estesi nello spazio che circonda la terra, realmente non esistono che tra due superficie, separate da un intervallo piccolissimo rispetto alle dimensioni del nostro pianeta.

435. Ad una profondità che varia secondo i luoghi, cessano come si è detto le vicende del calore comunicato alla terra dai raggi solari; ed il grado termometrico ivi è sempre lo stesso in tutte le stagioni dell'anno. Così un termometro costruito dal celebre Lavoisier con mercurio ben purgato e con tale ragione di diametro tra il bulbo ed il cannello da rendere valutabile anche un mezzo centesimo di grado, trovasi fin dal 1783 alla profondità $27^{m},6$ in una cava sottoposta all'Osservatorio di Parigi, ed ivi ha costantentemente segnato la temperatura di $11^{\circ},82$.

Calore proprio della terra.

Esiste dunque nell'interno del nostro pianeta uno strato in cui vanno a spegnersi tutte le oscillazioni dell'annua temperatura, è perciò detto *strato invariabile*. Or da questo strato progredendo verso il centro della terra si è trovata, fin dove si è potuto far discendere un termometro, una temperatura crescente colla profondità del punto di osservazione. Al che fa d'uopo aggiungere che le acque che vengon fuori dai pozzi artesiani, portano seco un grado di temperatura tanto più elevato, quanto più profonda n'è la sorgente. Così le acque del pozzo Grenelle a Parigi, che sorgono dalla profondità di 548 metri, sono calde di 27 gradi.

Or egli è chiaro che questo calore che nel nostro globo va crescendo da fuori in dentro, non può essere il risultato del-

l'azione solare, ma dev'essere o il residuo di una primitiva ignizione del pianeta, o vi è stato trasfuso dentro spazii di altissima temperatura dallo stesso percorsi nel primo periodo della sua esistenza.

Temperatura dello spazio.

437. Fourier pel primo ha considerata nello spazio planetario una temperatura indipendente da'raggi solari, e la cui esistenza è messa fuori dubbio dal fatto che salendo sempre più nell'atmosfera, la temperatura media del giorno diminuisce e più piccola si trova la differenza tra le temperature estreme del giorno e della notte; perciò lo spazio in cui questa differenza sarà nulla, avrà una temperatura indipendente dal calore irradiato dal sole. Or da molte osservazioni all'uopo eseguite si sono ottenuti i seguenti risultati:

Temperature medie del giorno.	*Variazioni estreme dal giorno alla notte.*
20°	10°,5
10	9,0
0	7,0
— 10	6,5
— 20	5,2
— 32	3,4

Or se queste due serie di numeri si prolunghino senza che resti alterata la legge della loro derivazione, si troverà che la serie delle variazioni estreme giungerà al termine 0°, quando quella delle temperature medie sarà pervenuta al termine —60°. Questo numero si potrà dunque ritenere come valore della temperatura dello spazio.

Il Pouillet per altra via ha trovato il numero —142°, ma il suo metodo va soggetto a molte cagioni di errori. Melloni solo avrebbe potuto risolvere un sì arduo problema.

Cagioni che fanno divergere le isoterme dai paralleli.

437. Se il calore prodotto dai raggi solari e quello ch'è proprio dello spazio non fossero modificati da altre cagioni, le isoterme dovrebbero confondersi coi paralleli geografici, ciò che non è affatto conforme alle osservazioni. Le principali cagioni produttrici della grande divergenza, che nel fatto si è trovata tra queste due specie di linee, possono ridursi alle seguenti.

1ª — *Altezza del suolo.* — È noto che la temperatura dell'aria va scemando come in essa ci eleviamo. Così in un viaggio aeronautico, eseguito dal Gay-Lussac a Parigi, la temperatura dell'aria, ch'era di 30°,7 nel punto di partenza, si trovò esser — 9°,5 all'altezza di 9677 metri. Vi fu dunque una differenza di 40°,2 per un'altezza che può valutarsi eguale alla settima parte di quella dell'atmosfera. Abbiamo di sopra esposte le cagioni che rendono l'aria più fredda a misura che si va più alto. Perciò le montagne e gli alti piani, in contatto di un ambiente più freddo dell'aria che sovrasta alle pianure ed alle valli, debbono disperdere più celeramente il calore che ricevono dai raggi solari; e questa perdita va poi aumentata dalla maggior superficie di emissione, e dalla deficienza di quella mutua irradiazione che conserva il calore delle basse pianure, e lo rende talvolta intollerabile nelle gole dei monti e nel fondo delle valli. Quindi si comprende la ragione delle nevi perpetue che coprono le cime degli alti monti fin sotto la zona dei tropici, e perchè nei viaggi aeronautici siasi trovato minor grado di freddo che sulle montagne a pari altezza.

2ª — *Vicinanza del mare* — Quelle oscillazioni atmosferiche, da cui nascono le brezze di mare e di terra, rendono nelle contrade marittime più mite il rigore del verno, meno eccessivo il calore dell'estate; imperocchè la superficie del mare riscaldandosi meno che quella della terra sotto l'azione dei raggi solari e meno raffreddandosi nella loro assenza, risulta più fresca dell'altra nell'estate e più calda nell'inverno. Quindi è che le isole hanno un clima presso che costante, e che l'inverno riesce così dolce nei paesi marittimi settentrionali. Sulle coste della Norvegia, per esempio, d'inverno è frequente la pioggia e rara la neve, e vi si consuma minor quantità di combustibile che a Cracovia, Praga e Vienna, non ostante la loro più bassa latitudine. Senza le acque del Mediterraneo che disperdono gran parte del calore dei venti africani, l'Europa meridionale avrebbe un'estate soffocante; e senza le correnti di aria che continuamente trasportano il calore dai tropici ai poli, maggior differenza di temperatura vi sarebbe tra la zona torrida e le glaciali.

3ª — *Giacitura delle montagne rispetto ai punti cardinali* — Se ad eguale latitudine la Siberia è più fredda della Russia europea, ciò dipende dalla diversa posizione che la catena dell'Himalaya e quella degli Urali hanno in riguardo ai punti cardinali : la prima impedisce il corso ai venti caldi dell'Asia meridionale, l'altra fa che i venti glaciali della Russia asiatica non abbiano libero accesso nella Russia europea. E similmente stanno difese contro i venti di nord l'Italia dalle Alpi, la Spagna dai Pirenei.

4ª — *Venti dominanti* — Date tutte le altre cose eguali, un paese dominato da venti caldi dovrà essere di una temperatura media, superiore a quella di ogni altro paese dominato da venti freddi.

5ª — *Esposizione del terreno* — Più fredda di tutte le esposizioni è quella di nord-est, più calda è la sud-ovest ; imperocchè la prima è tosto abbandonata dai raggi solari, dopo che n'è stato accresciuto il freddo per una più celere evaporazione, e la seconda è vivamente colpita dai raggi del sole che volge al tramonto, dopo esser stata riscaldata dall'aria tiepida del mezzogiorno.

6ª — *Forma dei continenti* — L'antico continente è molto esteso verso la linea percorsa dal sole, e poco s'inoltra nella regione polare; al contrario l'America del nord non presenta nel suo limite meridionale che una lingua di terra nell'Istmo di Panama, è ampia nella sua parte settentrionale, e molto si espande verso il nord per mezzo del Groeland. Nel primo continente vi è dunque più terra per assorbire i raggi solari, nel secondo ve ne ha di più per disperderli nello spazio. Quindi per eguale latitudine il primo sarà più caldo del secondo ; e così avviene che Quebec, a modo di esempio, che giace presso al parallelo di Venezia, ha non pertanto un inverno incomparabilmente più freddo.

Perciò nella zona dominata dai venti alisei, le coste orientali dell' antico continente son più fresche delle occidentali. Così avviene che il calore sia mite nello Zanquebar, ed intollerabile nella Guinea e nella Senegambia, a cui l'aliseo perviene dopo aver percorso l'infuocato suolo africano.

CAPO QUARTO.

IGROMETRIA.

438. Se in un giorno, in cui l'aria sembri perfettamente secca, versiamo in un bicchiere dell'acqua assai più fredda del mezzo ambiente, vedremo bentosto la faccia esterna del bicchiere coprirsi di rugiada. Questo fatto ci dimostra che nell'atmosfera vi è sempre del vapore acqueo sotto forma di fluido elastico invisibile, che una celere diminuzione di temperatura può far tornare allo stato liquido. Vapore atmosferico.

439. Quando i corpi, che fortemente assorbono l'acqua, mostrano bagnarsi pel solo contatto dell'aria, allora diciamo che questa è *umida*; al contrario la diciamo *secca*, allorchè l'acqua, che quei corpi potranno aver assorbita, si vede celeramente sparire per contatto dell'aria. Umidità e secchezza.

Or essendo noto (n° 103) che l'acqua ha continua tendenza a trasformarsi in vapore, è chiaro che l'umidità avrà luogo allorchè questa tendenza si troverà minore della forza con cui alcuni corpi assorbono l'acqua, ed al contrario si avrà secchezza quando questa forza di assorbimento risulterà minore della tendenza a gassificarsi. Dal che si rileva che questa forza produrrà il massimo effetto quando lo spazio ambiente sarà saturo di vapore, e minimo allorchè l'ambiente ne sarà privo del tutto: nel primo caso si avrà massima umidità, e massima secchezza nel secondo. E poichè allo stato di saturazione l'aria può giungere con differentissime quantità di vapore, così è chiaro che se la secchezza estrema rappresenta un valore assoluto, l'estrema umidità non può essere che relativa al punto di saturazione, e che in conseguenza i suoi diversi gradi debbono essere rappresentati dai rapporti che le quantità di vapore esistente hanno col massimo che vi potrebbe esistere. Poniamo, a modo di esempio, che l'aria avesse la tem-

peratura di 20°, e che la tensione del vapore in essa esistente fosse di $12^{mm},532$. Alla temperatura 20° il vapore che satura lo spazio (pag. 234) ha la tensione $17^{mm},391$; quindi il grado di umidità, nella nostra ipotesi, sarebbe espresso da:

$$\frac{12,532}{17,391}=0,726.$$

Le tensioni massime del vapore in corrispondenza alle diverse temperature, sono state già calcolate; e Régnault ce ne ha data una tavola estesa da —32° a +230°. Il problema dell'igrometria stà dunque in determinare la tensione del vapore che l'aria contiene nell' istante dell'osservazione; ed a ciò provvedono gli apparecchi denominati *igrometri* (misuratori dell'umido).

Igrometro di Saussurre.

440. Degl'igrometri finora inventati, alcuni agiscono assorbendo il vapore atmosferico, altri condensandolo, altri in fine determinando il grado di freddo prodotto dall'evaporazione dell'acqua. Alla prima classe appartiene l'igrometro di Saussure, alla seconda quello di Daniell, alla terza il *psicrometro* di August.

L'igrometro di Saussure consiste in un capello, a cui si è tolto il naturale untume lavandolo in una soluzione alcalina. Un estremo del capello è attaccato ad un punto fisso, l'altro lo è ad un asse intorno a cui sta in parte avvolto, e che per un leggiero contrappeso pendente da un filo girato in senso contrario, mantiene disteso il capello. All'asse sta fermato un indice scorrevole sopra un arco graduato, che fa conoscere il vario allungamento del capello, in conseguenza della diversa quantità di vapore ch'è stata assorbita.

L'istrumento si gradua dividendo in 100 parti eguali l'intervallo che separa le posizioni dell'indice negli estremi di umidità e di secchezza. Il primo limite si ottiene ponendo l'apparecchio sotto una campana che abbia la base immersa nell'acqua, ed il secondo si ha coprendo l'apparecchio con una campana bene asciutta, sotto la quale vi sia qualche vasellino pieno di cloruro di calcio o di altra sostanza disseccante.

Poichè il moto dell'indice è determinato dalla varia lunghezza del capello in conseguenza del vapore assorbito, è chiaro che la ragione dell'allungamento al vapore esistente nello spazio non è data immediatamente dalle indicazioni dell'istrumento, ma fa d'uopo cercarla per mezzo di esperienze preliminari: le quali, se son buone per la temperatura in cui furon attuate e per un certo intervallo di tempo dall' istante in cui il capello fu sottratto dall'impero delle forze vitali, cesseranno di essere applicabili a temperature diverse e ad epoche differenti nella durata delle chimiche trasformazioni, pel cui mezzo la materia organica ritorna ad esser materia bruta. Per queste considerazioni l'Igrometro di Saussure non appartiene che alla storia della scienza.

441. In un bicchiere di cristallo, che abbia sottili pareti, versiamo dell'acqua a temperatura dell'ambiente,ed in essa immergiamo un termometro; indi con acqua più fredda, che verseremo a poco a poco nel bicchiere, facciamoci ad abbassare la temperatura, fino al punto di vederne appannata la superficie esterna; e prendiamo nota della temperatura t che allora segna il termometro. Quel velo di rugiada che si depone sulla faccia esterna del bicchiere, ci dimostra che alla temperatura t in cui si appalesa, l'aria rimane saturata dal vapore che contiene. Questo dunque vi avrebbe la tensione f che in corrispondenza della stessa temperatura t ci sarà data dalla tavola delle tensioni, se l'aria avesse lo stesso grado termometrico t. Ma quello dell'aria è per ipotesi più elevato; in conseguenza la tensione del vapore dovrà essere più grande di f nella ragione del volume di esso vapore alla temperatura θ dell'ambiente al volume che occupa al grado t del punto di rugiada. Laonde indicando con α il coefficiente di dilatazione del vapore, il vero valore della sua tensione sarà $f\frac{1+\alpha\theta}{1+\alpha t}$.

Igrometro di Daniell.

Conosciuta così la vera tensione del vapore esistente nell' aria, ne avremo il grado u di umidità comparando la tensione trovata all' altra F che alla temperatura θ rendereb-

be l'aria saturata. Si avrà dunque :

$$u = \frac{f}{F} \cdot \frac{1+\alpha\theta}{1+\alpha t}.$$

Questo metodo è dovuto a Dalton. A fine di agevolarne l'uso Daniell inventava l'apparecchio rappresentato nella fig. 417, e che si compone di un tubo privo di aria e terminato dalle palline A e B, di cui la prima è in parte piena di etere nel quale pesca il bulbo di un piccolo termometro chiuso nel tubo, e la seconda è coperta di mussolina.

Volendo servirsi di questo igrometro, si comincerà dal far cadere successivamente delle gocce di etere sulla pallina B, finchè A non si mostri appannata: allora si leggerà il grado indicato dal termometro che vi è chiuso, e poi si procederà come sopra si è detto.

La cagione del raffreddamento della palla A e pel quale essa si copre di rugiada, sta in quello che soffre la palla B per la evaporazione dell'etere di cui è bagnata la sua faccia esterna, imperocchè ne vengono così condensati i vapori prodotti dall'etere contenuto in A, e quindi se ne accresce lo svolgimento. Dond'è che nel far cadere le gocce liquide sulla mussolina della palla B, bisogna andare abbastanza cauti per non produrre un raffreddamento più grande di quello che fa d'uopo per appannare la palla A, e che darebbe, come a parecchi osservatori è avvenuto, un grado di umidità minore del vero.

Psicrometro di August.

442. L'apparecchio igrometrico, denominato *psicrometro* dal suo inventore August, si compone di due termometri che vanno di perfetto accordo in tutta l'estensione delle loro scale, e di cui l'uno ha il bulbo libero, l'altro lo ha coperto di sottile mussolina, la quale per mezzo di alcuni fili di cotone che le stanno attaccati, assorbe l'acqua da un sottoposto recipiente, e così rimane sempre bagnata.

Se l'istrumento fosse situato in un ambiente perfettamente umido, l'acqua che bagna la mussolina del termometro vestito, non potendosi evaporare, non produrrebbe raffreddamento ed i due termometri segnerebbero uno stesso grado. Ma se

l'aria non è satura di vapore, questo si svolgerà dalla mussolina bagnata sottraendo calore dal termometro che n'è coverto, e la differenza tra le indicazioni dei due termometri sarà tanto più grande, per quanto l'evaporazione sarà più celere, vale a dire per quanto l'ambiente sarà più lontano dal punto di saturazione.

Nè basta considerare la sola differenza termometrica per avere la misura del vapore che manca alla completa saturazione, imperocchè se l'evaporazione toglie calore al termometro bagnato, la falda d'aria che lo circonda, gliene comunica; e quando ciò che perde per una via sarà pareggiato da ciò che riceve per l'altra, allora il termometro cesserà di abbassarsi. Or questo calore comunicato dovendo per una data temperatura esser proporzionale alla densità dell'aria e quindi all'altezza barometrica, ne segue che la celerità di evaporazione alla superficie del termometro bagnato dovrà seguire la ragion composta della differenza termometrica e dell'altezza del barometro. E perciò chiamando t la temperatura del termometro libero, t' quella del termometro bagnato, b l'altezza del barometro in millimetri e k un coefficiente costante, la tensione del vapore, che manca per la saturazione dell'aria, sarà espressa da $k(t-t')b$; ed in conseguenza la tensione e del vapore esistente sarà data dall'equazione:

$$e=e'-k(t-t')b,$$

nella quale e' indica la tensione del vapore che renderebbe massima l'umidità alla temperatura t'.

Della quale temperatura cercando il valore in un ambiente perfettamente secco, si avrà modo di determinare sperimentalmente k, imperocchè dovendo ivi essere $e=0$, si avrà mercè l'equazione precedente:

$$k=\frac{e'}{b(t-t')}.$$

Così, sapendosi che per la temperatura di 23° e sotto la pressione $0^m,760$ si ha nell'aria perfettamente secca $t'=9°$, si

otterrà : $k=0,0008054$.

Variazioni igrometriche.

443. Dalle osservazioni fatte da parecchi meteorologisti risulta che la quantità di vapore ed il grado di umidità dell'aria cangiano a norma — 1° delle ore del giorno — 2° dei mesi dell'anno — 3° della latitudine — 4° dell'altezza del punto di osservazione — 5° della maggiore o minor distanza dal mare — 6° della direzione del vento.

Rispetto alla variazione diurna si è trovato che la quantità di vapore va decrescendo dal tramonto al nuovo sorgere del sole; indi comincia a crescere, e nell'inverno giunge al suo massimo alquanto dopo il mezzogiorno. Nell'estate poi il momento del massimo precede il mezzogiorno; avviene un minimo nell'ora più calda, indi un secondo massimo verso la sera, donde poi si va decrescendo fino al nuovo levarsi del sole.

Quando poi alle variazioni annue ed a quelle relative sia alla latitudine, sia all'altezza del punto di osservazione, si è trovato che la quantità di vapore è maggiore di estate che di inverno, e che essa è decrescente dell'equatore ai poli e dal basso in alto.

Or tutti questi risultamenti dell'osservazione non sono che corollarii del principio che pone crescente colla temperatura la capacità dello spazio a contener vapore; e se nell'ora più calda dei giorni estivi la quantità di vapore si trova minima anzichè massima, ciò dipende dalle correnti ascendenti che portano via il vapore a misura che si forma, e che avendo massima forza quando la superficie della terra è più riscaldata, allora ne trasportano in maggior copia.

Fa d'uopo intanto osservare che tutte le esposte condizioni trovate necessarie all'esistenza di una maggior quantità di vapore, sono quelle che fanno risultare un minor grado d'umidità; ed in vero, se questa nasce da tendenza del vapore a liquefarsi, necessariamente essa deve diminuire sotto l'azione di quelle cause che concorrono alla produzione di maggior quantità di vapore. Quindi è che l'umidità è più grande di notte che di giorno, più d'inverno che di estate.

Or la presenza di una considerevole quantità di acqua essendo una condizione sufficiente perchè l'aria che vi sta a contatto restasse satura di vapore, ne parrebbe che quella sovrastante al mare dovesse aver sempre la massima umidità. Intanto le osservazioni han fatto rilevare che se l'umidità dell'aria marina è grande, purtuttavia non è massima, e ciò perchè i sali, che vi stanno disciolti, fanno sì (n° 150) che per eguali temperature svolgasi dall'acqua del mare minor quantità di vapore che dall'acqua dolce. Quindi è che in vicinanza dei fiumi l'umidità dell'aria suol essere maggiore che presso al mare.

CAPO QUINTO.

VARIAZIONI BAROMETRICHE.

Pretesa relazione delle variazioni barometriche col tempo sereno o piovoso.

444. In un medesimo luogo l'altezza della colonna barometrica talvolta varia da un'ora all'altra; e Torricelli osservando l'istrumento da lui inventato conobbe che il barometro suol discendere coll'avvicinarsi della pioggia, e salire col ritorno del buon tempo. Questo fatto, che non è costante, non è neppur generale; imperocchè se in Europa il buon tempo va sovente unito coll'innalzamento del barometro e la pioggia colla depressione dello stesso, in altre contrade suole avvenire precisamente il contrario. Sulle coste della Nuova Olanda, a modo di esempio, si osserva che i venti secchi di terra deprimono costantemente il barometro, e che quelli di mare viceversa lo innalzano; ed analoghe variazioni han luogo ancora verso l'imboccatura del Rio della Plata. «Si tien per certo, dice il Kämtz, che pioverà quando la pressione è piccola, e che dovrà al contrario far necessariamente buon tempo quando il barometro è alto. Se ciò non succede, i possessori di tali strumenti non cessano dalle lagnanze circa l'inesattezza degli stessi; però sarebbe meglio che essi si compiangessero in quanto che i pregiudizii loro sieno divenuti idee fisse ».

Intanto dalla discussione di tutte le serie di osservazioni barometriche eseguite in luoghi diversi, risulta che quando in un luogo il barometro discende, si debba esser certo che quella contrada è divenuta più calda delle sue circonvicine, sia per effettivo innalzamento della sua temperatura, sia per sottrazione di calore nelle altre; e che al contrario l'innalzamento del barometro va sempre unito ad un raffreddamento del luogo di osservazione rispetto a quelli che gli stanno d'intorno. La quale coincidenza di effetti non manca di sufficiente ragione, stante che quando la temperatura di un luogo diviene superiore a quella dei luoghi circostanti, allora la colonna atmosferica che gravita sul primo, elevandosi in conseguenza della sua maggior dilatazione, si riversa per l'alto sulle colonne adiacenti, e ne accresce il peso; quindi il barometro deve innalzarsi nei luoghi che rispetto ai circonvicini sono più freddi, ed abbassarsi in quelli che sono più caldi dei circostanti.

Con questo principio si rende ragione dell'influenza dei venti sull'altezza barometrica. La quale in Europa si accresce sotto l'azione dei venti freddi di nord-est, nord e nord-ovest, e diminuisce quando spirano i venti di sud-est, sud e sud-ovest, che son caldi; e poichè questi ci recano dal Mediterraneo e dall'Atlantico i vapori che alimentano le pioggie delle nostre contrade, mentre i primi riconducono il buon tempo, e così è surta l'idea di una immediata relazione tra i movimenti barometrici e lo stato sereno o piovoso dell'atmosfera. Questa relazione intanto non è che accidentale, imperocchè nell'emisfero del sud il barometro si eleva colla pioggia e scende col tempo sereno, appunto perchè son freddi i venti che ivi trasportano i vapori, e caldi quelli che producono il buon tempo.

Avviene talvolta che mentre il termometro segna un'alta temperatura, si vede il barometro rapidamente discendere e con moto quasi oscillatorio. È chiaro che allora una grande e subitanea rarefazione ha luogo in quel punto, e che l'aria non tarderà a slanciarsi dalle regioni circostanti per riparare a quel voto. Così si avranno dei venti impetuosi che scontran-

dosi per opposte direzioni produrranno una tempesta. Il barometro con una rapida depressione lo ha spesso annunziate ai naviganti ; e Scoresby nel suo viaggio pei mari polari ha saputo predirne l'ora e la violenza con tale giustezza da indovinar 17 volte su 18.

445. Le osservazioni eseguite sotto l'equatore han dimostrato che, comparativamente alla media sul mare, la pressione atmosferica allo stesso livello ivi è più piccola ; comincia poi dalla latitudine di 10° ad andar crescendo, e dopo aver toccato un massimo tra le latitudini di 30° e 40°, va poi sempre diminuendo nelle più alte latitudini.

Influenza della latitudine, delle stagioni e delle diverse ore del giorno.

Così apparisce l'andamento del barometro, osservato a diverse distanze dall'equatore, quando non si voglia distinguere la parte dovuta all'aria propriamente detta da quella che risulta dalla tensione del vapore atmosferico. Ma se questa tensione, che sappiamo esser decrescente dall'equatore ai poli si sottragga dall'altezza osservata nel barometro, si troverà, giusta il principio di sopra esposto, che realmente la pressione esercitata dall'aria secca sia crescente dall'equatore alle latitudini maggiori.

Conformemente allo stesso principio e corrette le osservazioni della parte dovuta alla tensione del vapore, si è trovato che la pressione va crescendo dall'estate all'inverno; di modo che l'atmosfera soffre un'oscillazione annua, per la quale fluisce d'inverno verso l'emisfero boreale e di estate verso l'australe.

Una consimile oscillazione ha luogo ancora in conseguenza della periodica variazione diurna della temperatura. Già parecchi osservatori l'aveano intraveduta frammezzo alle svariate mutazioni a cui va soggetta l'altezza barometrica nei luoghi lontani dell'equatore, quando trasportato l'istrumento nella regione dei tropici, si vide il fenomeno mostrarsi in tutta la sua regolarità. Ivi le oscillazioni diurne sono così costanti, che bastano le osservazioni di un solo giorno per far conoscere che la pressione è minima verso le ore 4 del mattino, va poi crescendo e giunge ad un massimo circa le ore 10°, indi decresce fino alle ore 4 della sera, e tocca un secondo massimo verso le ore 10° della stessa.

Queste ore in cui ricorrono i massimi e minimi delle variazioni diurne si mostrano indipendenti dalla latitudine, e dipendenti in vece dalle stagioni. Così d'inverno si trova che esse sono più vicine al momento del mezzodì che non sono di estate.

La grandezza poi della variazione diurna, ossia la differenza tra un massimo ed il minimo che lo segue, si mostra dipendente sì dalla stagione che dalla latitudine. Nell'estate la variazione è per uno stesso luogo più grande che d'inverno, ma la differenza difficilmente giunge al doppio; mentre quella prodotta dalla latitudine è assai più grande: così a Cumana si è trovata che la variazione diurna è 20 volte più grande che a Pietroburgo.

CAPO SESTO.

CONDENSAZIONE DEL VAPORE ATMOSFERICO.

Vapore vescicolare.

446. Quando la temperatura dell'aria scende più basso del grado che la rende satura del vapore in essa contenuto, questo lascia la forma di fluido invisibile e si aggruppa in tante piccole vescichette. Per farsene un'idea, basterà guardare con una lente d'ingrandimento il vapore che si alza da una tazza di caffè bollente, esposta ad una viva luce in mezzo ad un'aria tranquilla; si vedranno elevarsi da quel liquido infiniti globetti, di cui molti spariranno coll'innalzarsi, mentre altri dopo essersi elevati ad una certa altezza ricadranno sullo stesso liquido. Kratzenstein osservando al microscopio questi globetti, li vide ornati di anelli colorati; la qual cosa dimostra come essi sieno formati di vapore chiuso in una pellicola di acqua, che secondo i calcoli dello stesso Kratzenstein avrebbe la doppiezza di circa 0,000025 del pollice parigino.

Si comprenderà facilmente la genesi di queste vescichette, qualora si consideri che scendendo la temperatura dello spa-

zio, l'attrazione tra le molecole del vapore che vi è contenuto, diverrà preponderante ; quindi si avvicineranno l'una all'altra, ed a norma delle leggi statiche si comporranno in globetti sferici. Le molecole che si troveranno alla superficie dei globetti, perchè immediatamente esposte all'azione refrigerante dello spazio, passeranno allo stato liquido , e così formeranno quella pellicola donde la vescichetta è chiusa.

Le vescichette del vapore non sono egualmente grandi in tutte le stagioni. Kämtz ha trovato che d'inverno esse hanno maggior diametro che di estate, e di ciò è chiara la ragione. D'inverno perchè la pellicola si formasse fa d'uopo minor raffreddamento che di estate, stante che l'aria nella prima stagione è più vicina al punto di saturazione che nella seconda ; quindi è che nella prima meno che nella seconda le molecole di vapore si troveranno ravvicinate nel momento in cui la pellicola si forma.

447. Una massa di vapore vescicolare a contatto del suolo costituisce la *nebbia*. Perchè questa si formi , è d'uopo che l'aria sia poco lontana dal grado di saturazione, e sia più fredda del liquido donde il vapore si svolge. Quindi è che sotto forma di nebbia lo vediamo elevarsi dalla superficie dell'acqua bollente, ed una nebbia ancora si forma dal nostro alito nei giorni freddi ed umidi. **Nebbia.**

448. Una nebbia galleggiante nell'aria costituisce una *nuvola*, e che in conseguenza ha lo stesso modo di produzione della prima. Quelle zone di nuvole, a modo di esempio , che circondano le sommità dei monti, sono prodotte dalle correnti di aria che elevandosi pei fianchi della montagna trasportano il vapore a contatto di un corpo più freddo di quello che lo ha prodotto. E similmente avviene quel repentino annuvolarsi dell'aria quando una sensibile diminuzione di temperatura succede ad un calore durato per più giorni. **Nuvola.**

Le nuvole si presentano sotto diverse forme, che il meteorologista deve saper definire nel descrivere lo stato dell'atmosfera. Secondo Howard esse vanno ridotte a tre specie principali ; il *cirro*, lo *strato* ed il *cumulo*. Il cirro si presenta o

sotto forma di un pennacchio biancastro, o come filamenti ricciuti, o in fine a modo di una semplice rete. Le nuvole di questa prima specie sogliono occupare le più alte regioni dell'aria; il viaggiatore le vede dalla sommità dei monti come dal fondo delle valli, ed il Kämtz dietro misure direttamente prese, ne ha trovato alte 20000 e più piedi sul livello del suolo. Ad un'altezza così grande l'aria è di molti gradi sotto il punto di congelazione, ed in conseguenza i cirri non possono ivi esser composti che di particelle di neve; la qual cosa trovasi rifermata da alcuni fenomeni luminosi che in queste nubi sogliono aver luogo.

Lo *strato* è una zona di vapore vescicolare chiusa tra piani orizzontali. Queste nubi sogliono formarsi sui luoghi acquosi al cadere di un giorno sereno di estate, e spariscono al nuovo levarsi del sole.

Il *cumulo* nella forma più semplice rassomiglia ad un'emisfero poggiato sopra un piano orizzontale. Sovente se ne uniscono molti e formano quelle masse nuvolose che si elevano sull'orizzonte a guisa di montagne. Queste nuvole, che hanno offerte tante immagini ai poeti e tanta materia ai racconti dei montanari, nascono da vapori in alto portati dalle correnti ascendenti dell'aria; quindi è che si mostrano basse nelle prime ore del mattino, si elevano verso il mezzogiorno e poi scendono di belnuovo all'avvicinarsi della sera.

Se le nubi si compongono di vapore vescicolare, e questo di globetti che per esser formati da una pellicola di acqua contenente vapore elastico misto ad aria sono di questa più pesanti, parrebbe a prima giunta che la sospensione delle nubi nell'atmosfera dovesse riuscire impossibile. Togliendo di mezzo l'azione dei venti, che se trasportano a grandi distanze le ceneri dei vulcani e le sabbie dei deserti, più facilmente potranno menar via i globetti del vapore, facciamoci a considerare la sospensione delle nubi in un'aria calma. Poichè la vescichetta di vapore è più pesante del mezzo in cui si è formata, essa dovrà cadere, e cadendo andrà ad incontrare degli strati di aria sempre più caldi. Quindi verrà nuovamente a

trasformarsi in fluido elastico, che costretto a risalire dalla sua specifica leggerezza tornerà al contatto dell'aria fredda che lo cangerà una seconda volta in vapore vescicolare. E così il vapore durando in un continuo passaggio da vescichetta a fluido elastico e da questo a vescichetta, ci sembrerà galleggiante sulla falda di aria che segna il luogo delle due trasformazioni, e per la quale avviene che ogni nuvola vada sempre in basso terminata da un piano orizzontale.

449. Nelle notti calme e serene, specialmente di autunno, le erbe, i fili di paglia, ecc. sparsi sul suolo, si coprono di piccole gocce di acqua, che non possono aver altra origine che la liquefazione del vapore atmosferico, e propriamente di quello che giace nelle falde di aria prossime al corpo irrorato; imperocchè una pianta difesa da campana di vetro se ne copre quanto un'altra che sta libera, e la campana stessa si trova esserne più carica sulla faccia interna che sull'esterna. Rugiada.

Il fatto notissimo della consimile rugiada che si depone sulla faccia esterna di un bicchiere, quando vi si versi dell'acqua più fredda del mezzo ambiente, ci dimostra che ogni corpo che si trova irrorato, ha dovuto divenire più freddo dell'aria circonfusa; e se la rugiada vuole un cielo sereno e manca quando la notte è nuvolosa, bisogna dire che nel primo caso la superficie dei corpi soliti a coprirsene, è più fredda dell'aria ambiente, e non lo è nel secondo.

Per le quali considerazioni chiaramente si vede che il fenomeno della rugiada dev'essere una conseguenza dell'irradiazione termica della superficie terrestre, la quale se per mezzo di un cielo sereno disperde il suo calore nello spazio, ne riceve un qualche compenso dagli strati nuvolosi, quando l'atmosfera n'è ingombra. E delle osservazioni all'uopo eseguite hanno dato risultamenti conformi a queste deduzioni teoretiche. Sul finire dell'anno 1783 Wilson poneva in una notte due termometri, l'uno a contatto della neve di cui era coperto il suolo, l'altro nell'aria all'altezza di quattro piedi, e trovava nel primo la temperatura —21°, 7 e nel secondo —15°. Al presentarsi di alcune nubi vide sparire celera-

mente la differenza dei due termometri, e quando il cielo ne fu interamente coperto, essi segnavano — 13°. Più tardi Six osservava in un termometro poggiato sull'erba di un prato una temperatura di 7°,5 più bassa di quella indicata da un altro termometro che stava ad una certa distanza dal suolo. E queste ricerche furono poi ripetute ed estese sul cominciare di questo secolo dal dottor Wells, che primo si fece a dichiarare il fenomeno della rugiada per mezzo dell'irradiazione notturna. Egli poneva dei termometri a contatto di foglie vegetali, di terreno ecc; li copriva talvolta con falde di lana, di cotone, ecc. e sempre vi trovava una temperatura più bassa di quella indicata da un termometro che avendo il bulbo nudo stava fermato a quattro piedi dal suolo. Vide ancora che una tal differenza spariva sia per azione del vento sia per la presenza di nubi nello zenit dell'osservatore; e lo stesso effetto ottenne stendendo orizzontalmente su i termometri e ad una certa altezza un panno che li sottraeva dall'aspetto del cielo.

Intanto per ulteriori ricerche si veniva a conoscere che la rugiada comincia sempre dal mostrarsi sulle foglie delle piante assai basse, va poi a mano a mano raggiungendo quelle delle piante più elevate, senza lasciarsi giammai vedere sulle foglie degli alberi di alto fusto. Questo fatto rendeva inammissibile la dottrina del Wells, imperocchè se il raffreddamento notturno degli oggetti terrestri rispetto all'aria ambiente fosse di quel grado ch'era apparso nelle osservazioni termometriche, la rugiada avrebbe dovuta manifestarsi primieramente su gli oggetti più distanti dal suolo, come quelli che maggior copia di calore possono disperdere nello spazio celeste.

D'altronde l'appannarsi dei corpi decisamente più freddi dello spazio ambiente è un fatto costante: e se il progredire della rugiada in altezza sembra non esservi conforme, la divergenza potrà dipendere da una falsa valutazione della temperatura dell'aria e dei corpi irrorati. Partendo da questo concetto, Melloni istituì una serie di ricerche sul raffreddamento notturno, e n'ebbe risultamenti che gli valsero a poter chiarire tutte le concomitanze del fenomeno della rugiada.

Egli cominciò dall'osservare — 1°. Che non si può misurare il raffreddamento prodotto dall'irradiazione, comparando le indicazioni di un termometro a contatto del suolo con quelle del termometro che n'è lontano di più piedi, stante che il primo termometro è circondato d'aria più fredda di quella che sta intorno al secondo — 2°. Che il termometro, raggiando al pari di ogni altro corpo e vieppiù allorchè comincia ad irrorarsi, deve necessariamente esser più freddo dell'aria di cui è destinato a rilevare la temperatura; e che in conseguenza questa non potrà esser definita che da un termometro, il cui potere raggiante sia reso del tutto nullo.

Dietro queste considerazioni egli situava i termometri ad eguali distanze dal suolo, dopo averne annullata l'irradiazione nel seguente modo. Egl'introduceva il cannello del termometro in un cilindretto di sughero che da un lato faceva imboccare con un ditale di argento ben terso, destinato a coprire il bulbo del termometro, e dall'altro con un tubo di latta a fondo chiuso che racchiudeva il resto del cannello. E per assicurarsi che i termometri rimanessero così guarentiti contro gli effetti della loro irradiazione, ne armò tre allo stesso modo, lasciando tersa l'armatura di argento a due di essi, e coprendo di nerofumo quella del terzo: li adagiò orizzontalmente in tre recipienti di latta a forma di cono troncato colla base minore in basso, e che stavano sorretti da tre sottili tubi di latta lunghi mezzo metro; ed i termometri vi entravano per un foro prossimo alla base inferiore del recipiente, e restavano fermi per mezzo di turracciuoli di sughero. Preparati così i tre recipienti e chiusi con coperchi della stessa loro sostanza, furono in una notte calma e serena esposti sopra un terrazzo che di 15 metri si alzava sul sottoposto terreno; e dopo mezz'ora si trovò che i termometri segnavano una stessa temperatura. Indi si lasciò chiuso un solo dei due recipienti che contenevano termometri ad armatura tersa, l'altro recipiente e quello del termometro con armatura annerita furono aperti; si vide allora che i termometri con armatura tersa, quantunque l'uno fosse libero di raggiare il suo calore nello spazio

mentre l'altro n'era impedito dal coperchio del suo recipiente, purtuttavia continuavano a segnar una stessa temperatura, quando il termometro con armatura annerita era già disceso di 3°,4. Il termometro dunque ad armatura lucida non irradiava di quantità sensibile, e poteva in conseguenza far conoscere la temperatura dell'aria ambiente.

Trovato così il mezzo di definire questa temperatura, Melloni pose in altrettanti vasi conici più termometri armati, l'uno libero, gli altri coperti di diverse sostanze, e non ebbe raffreddamento più grande di 3°,40. Questo si ottenne dall'irradiazione del nerofumo; le foglie vegetabili diedero 2°,9 e meno ancora si ebbe dal terriccio.

Questi gradi intanto esprimono il massimo raffreddamento, di cui le dette sostanze possono scendere sotto la temperatura dell'aria ambiente, imperocchè esposte come erano nei vasi conici, essi perdevano continuamente calore, senza poterne ricevere dall'irradiazione dei corpi circostanti. Ma se esse non fossero state protette dalle pareti dei loro vasi, il loro raffreddamento sarebbe stato di assai minore; ed in fatti il nerofumo in simile condizione non fece scendere il termometro che di 1°,3, e le foglie dei vegetali non diedero nelle circostanze più favorevoli un raffreddamento inferiore a 2°. Quello di 8° e talvolta di 10°, osservato dai fisici che prima di Melloni avevano studiato gli effetti dell'irradiazione notturna, era inesatto perchè i loro termometri erano più freddi dell'aria ambiente.

Oltracciò Melloni ha richiamata l'attenzione dei fisici su i seguenti fatti, per mezzo dei quali egli ha potuto conciliare le diverse fasi della rugiada col principio dell'irradiazione notturna — 1° Che quando i corpi cominciano ad irrorarsi, la falda di aria che li circonda è sommamente umida; imperocchè un igrometro a capello ivi segna da 90° a 98° — 2° Che qualunque sia la temperatura del mezzo ambiente, un corpo per effetto dell'irradiazione notturna ne scende sempre della stessa quantità gradi. Così Parry e Scoresby trovarono la superficie della neve sempre di 9° più fredda dell'aria sovrastante, fosse

questa a —1°,—2°, ovvero a —21°,—22°. E Melloni stesso ha dedotto da alcune sperienze di Pouillet che le piume di cigno per effetto dell'irradiazione notturna si raffreddano di circa 7° sotto la temperatura dell'aria ambiente, sia questa a 0°, sia a 20° o più.

Premessi tutti questi dati, ecco come Melloni ha coordinato il fatto della rugiada all'altro dell'irradiazione notturna — Le foglie delle piante, irradiando verso un cielo sereno, si raffreddano e sia anche di 1° sotto la temperatura della falda di aria ad immediato contatto. Questa cedendo alla foglia porzione del suo calore, diverrà più densa e perciò scenderà verso il suolo, cedendo il posto ad una seconda falda; alla quale similmente terrà dietro una terza, a questa una quarta, e così di seguito. E se la foglia, come son quelle delle piante erbacee, è poco lontana dal suolo, le falde di aria che l'hanno successivamente abbandonata, cadendo per la loro accresciuta densità, torneranno nel medesimo ordine a toccarla di nuovo, dopo che riscaldate dal contatto del suolo risaliranno per esser divenute più leggiere. Così nello strato di aria, chiuso tra la foglia ed il suolo, verrà attuandosi un moto vorticoso, nel quale ciascuna falda scenderà più fredda della precedente, perchè la temperatura della foglia conservando una differenza costante con quella dell'aria a contatto, diverrà sempre più bassa, e la stessa falda risalirà poi con dose di calore sempre più piccola, perchè continuamente più fredda si renderà la superficie del suolo. Laonde la temperatura di quello strato continuamente abbassandosi, giungerà bentosto al grado che lo renderà saturo del vapore che vi è contenuto; ed allora questo deponendosi in parte su i corpi divenuti più freddi, darà cominciamento alla produzione della rugiada.

Da questa analisi del fenomeno risulta, conformemente ai dati dell'osservazione — 1° Che alla produzione della rugiada faccia d'uopo una notte calma e serena, imperocchè un cielo nuvoloso rinviando gran parte dei raggi colorifici emessi dai corpi terrestri, ed il vento che sconvolge il moto vorticoso dell'aria, si oppongono egualmente al suo raffreddamento e quin-

di alla sua saturazione col vapore che contiene — 2° Che l'aria circonfusa alle piante debba avere estrema umidità — 3° Che bisognerà un tempo tanto più grande a raffreddare l'aria fino al grado di saturarla col vapore contenuto, per quanto più doppio ne sarà lo strato sottoposto al moto vorticoso; e che in conseguenza la rugiada debb'ascendere col progredire della notte, la quale d'ordinario finisce prima che quella possa raggiungere le foglie degli alberi di alto fusto — 4° Che la rugiada debba esser più abbondante ove l'aria è più carica di vapore; come avviene nei luoghi prossimi ai laghi ed ai fiumi, ed in qualunque luogo dopo la caduta di un'abbondante pioggia — 5° Che una campana di vetro poggiata sul suolo in una notte favorevole alla rugiada, debba coprirsene più sulla faccia interna, che sull'esterna — 6° Che la rugiada debb'essere più abbondante di autunno, che in ogni altra stagione, stante che in quell'epoca dell'anno ad un forte calore diurno che produce copioso svolgimento di vapore, succede una notte abbastanza lunga per produrre un intenso raffreddamento. E quantunque ad ogni giorno di primavera corrisponda un giorno di autunno di egual durata del sole sull'orizzonte e di eguale inclinazione dei suoi raggi, purtuttavia nella prima stagione l'aria essendo d'ordinario più fredda vi è minor produzione di vapore e quindi minor copia di rugiada che nella seconda. Nell'estate poi la notte è troppo breve, ed anche nell'assenza del sole l'aria è assai lontana dal grado di saturazione. E nell'inverno in fine mancano le foglie che raffreddandosi potessero farvi precipitare il vapore atmosferico; si hanno invece delle gelate per l'intenso raffreddamento che soffrono le piante e l'acqua sparsa sul suolo.

Pioggia. 450. Se un certo grado di raffreddamento trasforma il vapore invisibile in vescicolare, un raffreddamento maggiore lo cangerà in liquido e produrrà la pioggia. Esaminando le circostanze che accompagnano la produzione di questa meteora, troveremo che realmente essa ha luogo quando una massa di aria calda e carica di vapori riceve una certa diminuzione di temperatura.

Ed incominciando dalla zona compresa tra i tropici, osserviamo che ivi le pioggie si succedono con tale regolarità di periodo, che l'anno vi è distinto in due sole stagioni, l'una *secca*, l'altra *piovosa*. Questa vi ha luogo quando il sole è prossimo allo zenit, imperocchè allora la corrente ascendente dell'aria, durante il giorno, divenendo più energica, solleva una gran massa di vapore, la quale condensandosi pel freddo che regna nelle alte regioni dell'atmosfera, copre il cielo di grosse nuvole, e finalmente si scioglie in pioggia. E poichè nei luoghi di quella zona che stanno più vicini ai tropici, il sole passa due volte per lo zenit in piccolo intervallo di giorni, così la stagione piovosa vi è unica, ma nel suo corso presenta due massimi: al contrario sotto l'equatore ed i paralleli che gli stanno vicini, i due passaggi del sole per lo zenit si succedono a maggior intervallo di tempo, perciò in ogni anno vi sono due stagioni piovose e due secche.

In generale la stagione piovosa della zona dei tropici dura pochi mesi, e durante il suo corso la pioggia non è continua. Questa d'ordinario ha luogo verso l'ora più calda del giorno, e coll'avvicinarsi della notte il cielo ritorna ad essere sereno. Ciò non ostante su quella zona cade maggior quantità di acqua che su ogni altra regione della terra, stante che la pioggia vi è a grosse e copiosissime gocce, effetto della immensa quantità di vapore sollevata da una forte azione del sole.

Analoghe prove ci somministrano le zone temperate. I vapori dell'oceano atlantico alimentano le pioggie dell'Europa occidentale; e che trasportati dai venti di ovest nella stagione invernale, si sciolgono in pioggia a misura che vengono a mescolarsi coll'aria fredda sovrastante alla terra. Quindi è che nell'inverno la pioggia è abbondante sulle coste occidentali dell'Europa, ed è scarsa nell'interno, essendo che i venti di ovest hanno già perduta la massima parte della loro umidità, quando pervengono sulla regione centrale del continente. Al contrario nella stagione estiva i vapori possono giungere a maggiore altezza prima di farsi vescicolari; quindi le nubi non più arrestate dalle catene dei monti possono vieppiù inol-

trarsi sulla terra ferma prima di sciogliersi in pioggia. Kämtz indicando coll' unità la quantità di vapore che nell' inverno va precipitata nelle contrade qui appresso segnate, ha trovato rispetto all' estate i seguenti numeri :

Ovest dell'Inghilterra	0,868
Est della medesima	1,131
Ovest della Francia	1,071
Est della medesima	1,540
Germania	1,042
Pietroburgo	2,670

Questi numeri suppongono delle misure, che si eseguono mercè taluni strumenti, denominati *udometri* o *pluviometri*. Consistono d'ordinario in vasi cilindrici terminati da un fondo conico che comunica con un sottoposto serbatoio ben chiuso a fine d'impedire l'evaporazione dell'acqua ivi raccolta. La quale si fa poi passare in un tubo di cristallo graduato in pollici cubici, e se ne misura l'altezza. Allora conoscendo la ragione del diametro del tubo a quello del cilindro in cui è caduta la pioggia, si potrà definire l'altezza dell' acqua nel cilindro, ed in conseguenza la quantità che n'è caduta nel luogo dell'osservazione.

Con udometri situati a diverse altezze ed in verticali poco distanti si è conosciuto che la quantità di acqua caduta in una medesima pioggia non di rado varia coll'altezza; dimodochè sul suolo talvolta se ne ha più e talvolta meno di quella raccolta all'altezza di un centinaio di piedi. Il primo caso suol avvenire quando l'aria, che le gocce attraversano prima di toccare il suolo, è assai umida, imperocchè generate in un ambiente più freddo che non sono gli strati inferiori dell'aria, esse condensano il vapore che incontrano nel loro tragitto, e divengono più grandi. Al contrario se gli strati atmosferi posti tra la nube e la terra sono assai secchi, le gocce per evaporazione dalla loro superficie scemeranno di massa nella loro caduta, e ne potranno perder tanto da sparire prima di toccare il suolo. Così vedesi talvolta su qualche strato nuvoloso in distanza, che quell'aspetto rigato risultante dalla

risoluzione di una nube in pioggia, non si estende fino all'incontro della superficie terrestre.

451. Posta la grande altezza dei cirri (nº 448), essi non possono consistere che in fiocchetti di neve galleggianti nelle alte regioni dell'atmosfera, sia perchè trasportati da venti, sia perchè respinti dalle correnti ascendenti dell'aria. Neve.

La neve, bianca opaca molle, nasce dalla congelazione del vapore vescicolare, al contrario il ghiaccio, limpido duro, proviene dalla solidificazione dell'acqua. Se un certo abbassamento di temperatura può risolvere il vapore vescicolare in pioggia, un più forte abbassamento lo cangerà in neve. La quale per la sua forma fiocconosa presentando larga superficie alla resistenza dell'aria, vi scende con estrema lentezza; e perciò se gli strati di aria che il fiocco di neve attraversa, non hanno una temperatura prossima al punto di congelazione, od anche più bassa, la neve potrà rimaner liquefatta lungo il suo cammino, e giungerà a terra sotto forma di freddissima pioggia. Così vediamo sovente che la stessa precipitazione di vapore che ci dà la pioggia sopra le basse pianure, copre di neve le vicine montagne.

Quando la temperatura dell'aria è assai bassa, non può esservi che pochissimo vapore, ed il cielo di ordinario è sereno. Kämtz dice aver veduto una sola volta nevicare alla temperatura di —18°, ma la neve cadeva in piccolissimi granelli.

CAPO SETTIMO.

ELETTRICITÀ ATMOSFERICA.

452. Dopo che Francklin ebbe scoverta l'elettricità temporalesca, sottraendola dalle nubi per mezzo di un cervo volante, parecchi fisici si fecero a ricercare se ve ne fosse ancora a ciel sereno. A tal uopo si usò piantare verticalmente, ed in luoghi liberamente esposti, delle verghe metalliche isolate, Prime ricerche sull'elettricità atmosferica.

e rese aguzze nell'estremità superiore perchè meglio succhiassero l'elettricità dall'aria; e con esse si fecero comunicare degli elettroscopii, che col moto dei loro pendolini svelassero le fasi dell'elettricità atmosferica. Così facendo si è trovato:

— 1°. Che l'aria calma e serena è quasi che sempre carica di elettricità positiva, la cui tensione è varia colle diverse ore del giorno e colle diverse stagioni dell'anno.

— 2° Che la tensione elettrica dell'atmosfera si accresce durante la formazione della rugiada o pel sopraggiungere di una nebbia; e che le gocce di pioggia ed i fiocchi di neve sono anch'essi elettrizzati, ma per lo più negativamente. Quindi si venne a comprendere perchè la neve di fresco caduta assumesse talvolta un aspetto luminoso, come nel mese di Marzo dell'anno 1823 avvenne nella Scozia sul lago Luchawe ed i luoghi circonvicini. Dopo un'abbondante caduta di neve, la superficie del lago unitamente alle sue adiacenze apparve coverta da un immenso strato di fuoco.

— 3° Che forti sbilanci elettrici avvengono nell'atmosfera, quando essa è agitata da un temporale, imperocchè gli elettroscopii esposti all'aria libera si veggono allora rapidamente oscillare nelle loro indicazioni, sia per subitanei cangiamenti di tensione, sia per celere passaggio dall'una all'altra delle due elettricità.

Nuove ricerche sul medesimo subbietto. Metodo di Peltier.

453. Saussure aveva osservato che un elettroscopio celeramente elevato nell'aria libera, si carica dell'elettricità regnante nell'atmosfera; e che se allora si scarichi l'apparecchio, e si riduca al suo primo livello, si vedrà indicata l'elettricità contraria. Per l'opposto questa si appaleserebbe prima dell'altra, se si cominciasse dall'abbassare l'elettroscopio per poi elevarlo dopo averlo scaricato.

Questa scoverta del Saussure faceva conoscere che l'atmosfera e la superficie terrestre sono continuamente in due stati elettrici opposti, e che in conseguenza il metodo delle osservazioni con conduttori ed elettroscopii fissi non fosse il meglio appropriato ad esplorare l'elettricità dell'aria, stante che questi apparecchi, come ogni altro corpo conduttore messo

tra due altri eteronimamente elettrizzati, potrebbero rimanere inerti conservando lo stato naturale, quantunque l'atmosfera fosse tuttavia elettrica.

Non ostante la sua alta importanza il fatto, di cui parliamo, fu bentosto dimenticato; e già Ermann lo aveva inutilmente richiamato all' attenzione dei meterologisti con nuovi sperimenti, quando Peltier facendone tesoro ideava un nuovo elettroscopio che fosse acconcio all'uopo. Questo apparecchio si compone di una grande palla in lamina di ottone, sorretta da un' asta dello stesso metallo che in basso finisce a modo di staffa. A questa nello stesso suo piano sta formato orizzontalmente un bastoncello anche di ottone, a cui pel verso della sua lunghezza sta a contatto un filo di metallo, che si bilica sopra una punta eretta nel vano della staffa, e che dalla forza direttrice di un piccolo ago magnetizzato che vi è congiunto, è ritenuto in quella posizione quando l' apparecchio è convenientemente orientato.

Or immaginiamo che alla palla dell' elettroscopio sia avvicinato un corpo carico di elettricità positiva; la palla diverrà elettronegativa, e l'elettricità omonima a quella del corpo agente sarà respinta verso la base dell'istrumento, ove diffondendosi sul bastoncello e l'indice, farà che questo ne sia ripulso per un numero di gradi più o meno grande a norma della carica.

Su questo modo di agire dell'apparecchio è basato il metodo di farlo servire alle ricerche sull'elettricità atmosferica. In una stanza situata nella parte più elevata dell'edifizio pongasi l'elettroscopio sopra una tavola e si orienti in modo che l'indice tocchi il vicino bastoncello senza premerlo. Si facciano dei segni sulla base dell' istrumento e la tavola che lo sostiene, in modo che togliendolo di là, si possa poi restituire alla stessa posizione che prima occupava. Dopo ciò si porterà l' istrumento sul tetto della stanza, ed ivi elevandolo si toccherà con un dito a fine di scaricarlo dell'elettricità che l' atmosfera avrà potuto indurvi, e che per la posizione elevata dell' istrumento l' osservatore non può veder indicata; poi ab-

bassatolo, si riporterà nella stanza rimettendolo nel luogo che prima occupava. L'elettricità allora indicata dall'istrumento sarà opposta a quella dell'atmosfera, e la sua tensione, meno la perdita sofferta nel trasporto, sarà proporzionale a quella dell'aria.

Metodo del prof. Palmieri.

454. Quantunque il metodo di Peltier sia stato adottato in alcuni osservatorii meteorologici, purtuttavia non era soddisfacente ai bisogni della scienza neppur per l'epoca della sua invenzione. E per fermo tolta di mezzo la sua maggior efficacia a rilevare l'esistenza di un'elettricità nell'aria, non poteva poi esser commendevole pel modo di misurarne la tensione. Nulla poi diciamo delle gravi difficoltà che s'incontrerebbero se si volessero fare delle osservazioni a brevi intervalli di tempo, od eseguirle mentre spira un vento gagliardo o sotto una pioggia dirotta.

In questo stato d'infanzia si trovava l'elettrologia atmosferica, quando nel 1846 il prof. Palmieri cominciava a farne obbietto delle sue ricerche. Dopo aver riconosciuta nelle sue stesse osservazioni la superiorità del metodo di Peltier sul precedente, tosto comprese come verun reale progresso si potrebbe fare in questa branca di conoscenze meteorologiche, prima che si fosse rinvenuto il mezzo di rendere le osservazioni sommamente spedite ed esattamente comparabili. Al qual uopo, movendo dal fatto scoverto da Saussure, egli concepì il felice disegno di rendere mobile il conduttore e lasciar fisso l'elettroscopio. Così alla facilità di svolgere gli effetti dell'influsso elettrico dell'atmosfera si è congiunta quella di osservarli nel momento stesso che si producono ; e la prova si può reiterare ogni volta che ne talenta, senza che forti colpi di vento o rovesci di pioggia potessero impedirla.

Per farsi un'idea dell'apparecchio del prof. Palmieri s'immagini una stanzetta costruita sul tetto di un alto edifizio, e che per un foro scolpito nella sua copertura lasci passare il conduttore mobile, consistente in una canna di ottone lunga $2^{m},85$ e doppia 14 a 15 millimetri. Questa canna, che per un giudizioso congegno ideato dall'autore trovasi perfettamente i-

solata, finisce superiormente in un globo metallico armato di una punta in cima, ed inferiormente in una girella che nella sua gola accoglie un cordone di seta, che tirato giù fa celeramente salire il conduttore. Il quale poi per mezzo di un filo di rame sta congiunto all'elettrometro e talvolta ad un galvanometro atto alle correnti di molta tensione.

Quantunque per la natura di quest'opera non potessimo che accennare gl'importanti trovati del prof. Palmieri in questo ramo di meteorologiche osservazioni, purtuttavia non possiamo tacere che l'ordinario elettroscopio mercè de'suoi studii sia divenuto un vero elettrometro, dimodochè per luoghi assai diversi si possono comparare le quantità di elettricità atmosferica colla stessa precisione con cui se ne può definire il calore per mezzo del termometro e la pressione coll'aiuto del barometro.

Da una lunga serie di osservazioni fatte con questo appaparecchio sul R. Osservatorio meteorologico vesuviano il prof. Palmieri ha ottenuto i risultamenti, che seguono, rispetto all'elettricità a ciel sereno, a cielo nuvoloso ed in tempo di pioggia, e finalmente durante i temporali.

— 1° *Elettricità a ciel sereno* — A ciel sereno l'elettricità atmosferica è sempre positiva, e se talvolta si mostra negativa, ciò avviene sol quando vi sieno in distanza delle nubi che si sciolgono in pioggia — Nelle giornate serene e calme, o almeno non agitate da venti impetuosi, l'elettricità atmosferica mostra seguire periodiche variazioni, le quali in giorni diversi non ricorrono alle medesime ore. L'azione del vento le turba facendo scemare la tensione; e se non ostante che il giorno sia sereno e calmo, purtuttavia si appalesano grandi perturbazioni nel periodo elettrico, ciò suol essere indizio di un prossimo cangiamento di tempo — L'umidità dell'aria suole accrescerne la tensione elettrica; e quando di sera si ha molta elettricità a cielo sereno ed aria calma, si è quasi certo che nella prossima notte si deporrà molta rugiada — Oltre al periodo diurno l'elettricità a ciel sereno presenta ancora un periodo annuo di massima elettricità nell'inverno, e minima nell'estate.

— 2° *Elettricità a ciel nuvoloso* — Le nubi, finchè non si risolvono in pioggia, grandine o neve, hanno sempre elettricità positiva, ma scarsa e di gran lunga inferiore a quella del ciel sereno. Quindi è che la tensione diminuisce nell'elettrometro quando una nube si avvicina allo zenit dell'osservatore, e si accresce quando essa se ne allontana [1].

— 3. *Elettricità in tempo di pioggia* — Manifestazioni di abbondante elettricità si hanno nell'atto di una pioggia, e si appalesa più o meno copiosa secondo la quantità più o meno grande di vapore che si risolve in acqua. Tenendo allora alquanto elevato il conduttore mobile, la tensione elettrica riesce così grande da non potersi più misurare; avvicinandovi un dito, non di rado se ne traggono scintille assai vivaci; facendolo comunicare col galvanometro, questo si mette in azione. Quando l'elettricità atmosferica si appalesa in tanta copia, vi è sempre della pioggia, della grandine o della neve che cade, e talvolta a distanza di molte miglia dal luogo delle osservazioni.

Tutti gli osservatori che prima del Palmieri avevano studiata l'elettricità atmosferica in tempo di pioggia, l'avevano trovata abbondante ma estremamente varia nella sua natura, poichè la rinvenivano or positiva, or negativa, talvolta nulla; e non di rado da un momento all'altro. Or tutte queste variazioni che non sembravano sottoposte a veruna legge, ne hanno nonpertanto una, la quale è stata scoverta dal Palmieri e da lui formolata nel seguente modo:

Dove cade la pioggia si ha elettricità positiva con un'onda o zona intorno di elettricità negativa, la quale è a sua posta circondata da un'altra zona di forte elettricità positiva discernibile solo nei grandi rovesci e nelle piogge temporalesche.

« Per verificare questa legge (sono parole dello stesso au-

[1] Questo fatto si riproduce a capello, quando una lamina metallica isolata od anche una lamina di vetro si pone tra un corpo elettrizzato ed un elettroscopio a foglie d'oro giacente nella sfera di azione di quel corpo. Donde è chiaro che l'elettricità manifestata dalle nubi, è la stessa elettricità atmosferica agente attraverso quello strato di vapore vescicolare.

tore, tolte dalle sue pregevolissime *Lezioni di Fisica sperimentale*) bisogna provvedersi del conduttore mobile e dell'elettroscopio di Bohnenberger collocati in luogo eminente da cui si scopra un vasto orizzonte. Supponete che una pioggia cominci a cadere molto lungi da voi e che si accosti per modo che passando pel luogo delle osservazioni vada a cessare dalla parte opposta e ad una conveniente distanza ; ecco le fasi o periodi elettrici che voi potrete osservare — 1. Quando la pioggia è ancora molto lungi da voi e sia forte abbastanza, noterete un sensibile aumento di elettricità positiva, la quale coll'approssimarsi della pioggia rapidamente declina per ridursi a zero — 2. Approssimandosi di più la pioggia, si avrà forte elettricità negativa la quale giunta ad un certo segno di aumento rapidamente decresce per ridursi a zero — 3. Cominciando a cadere la pioggia sul luogo delle osservazioni, l'elettricità diviene novamente positiva — 4. Ma come la pioggia è passata, ritorna la fase di elettricità negativa come nel periodo secondo — 5. Finalmente se la pioggia è forte e continua ad allontanarsi , rinascerà la fase del periodo primo. Questi cinque periodi si possono nettamente discernere nella caduta dei grandi rovesci di pioggia o della grandine, ma nelle piogge ordinarie il primo ed il quinto potranno non rendersi manifesti, perchè trattandosi di un leggiero aumento nell'elettricità abituale dell' atmosfera potranno facilmente perdersi di vista e rimarranno solo palesi i tre periodi che possonsi denominare di *avvicinamento*, di *caduta verticale* e di *allontanamento* della pioggia ».

« È chiaro poi che siccome la pioggia può solamente cadere più o meno lungi dal luogo delle osservazioni o finire in esso, ecc., così spesso vi sarà possibile di osservare soltanto i fenomeni appartenenti ad un solo o due degli enunciati periodi ; ma non mancheranno occasioni, a chi osserva con perseveranza, di vederli tutti nel corso di una medesima pioggia che cammina col favore del vento che spinge innanzi le nubi ».

« S'intende ancora agevolmente come sia possibile avere

delle apparenti eccezioni a questa legge, quando cadono nello stesso tempo più piogge in diversi luoghi non molto lontani, e come sia facile avere *elettricità negativa nel luogo dove cade la pioggia*. E veramente, supponete che mentre piove nel luogo delle vostre osservazioni, ad una certa distanza cada un'altra pioggia più copiosa e di maggiore estensione; è chiaro che mentre aver dovreste elettricità positiva per la pioggia che cade sopra di voi, per l'altra che sta poco lungi vi toccherebbe elettricità negativa, dovete dunque osservare la differenza la quale nel nostro caso dovrà essere di elettricità negativa. E così oltre quei *momenti neutri essenziali* che segnano il passaggio da un periodo all'altro seguente, possonsi avere anco dei *momenti neutri accidentali* per reciproco influsso di più piogge. Fu tale appunto il caso della pioggia del 14 giugno 1852 studiata dal Quetelet.... Per la qual cosa chi brami verificare la legge suddetta aspetti la opportunità di quelle piogge solitarie e non molto estese che nei luoghi eminenti si veggono venire da lungi col favore del vento ».

« La distanza poi da cui la pioggia comincia a far sentire le sue elettriche influenze è varia , per modo che talora è grandissima, cioè di circa 40 miglia geografiche, talvolta piccolissima , di circa un miglio , e secondo tutte le apparenze ciò deriva dalla copia ed estensione del rovescio , per cui le grandi procelle si annunziano da maggiori distanze, e le piccole piogge hanno una sfera di azione molto limitata ».

— 4° *Elettricità dei temporali* — I temporali non sono che piogge le quali cadono a grandi rovesci, mentre spirano venti oltremodo impetuosi: sono talvolta accompagnate da grandine, e sempre da lampi e tuoni.

Le fasi che presenta l'elettricità atmosferica durante un temporale sono le stesse di quelle che si osservano nelle piogge ordinarie, ma la tensione n'è incomparabilmente più grande, e quindi quelle zone di cui sopra si è parlato riescono assai più ampie.

Fulmine. 455. Dalle accurate osservazioni del prof. Palmieri, di cui si è fatto un cenno nel n° precedente, risulta che le nubi

non hanno un'elettricità propria, che daltronde pei principii della scienza non potremmo ammettere senza supporre la possibilità di una nube in un ambiente estremamente secco. Quindi a ragione egli riguarda l'elettricità delle piogge, sieno tranquille sieno temporalesche, come prodotta dal fatto stesso della trasformazione del vapore in acqua. E questo suo concetto è in pieno accordo e col fatto dell' elettricità osservata nelle nebbie le cui vescichette di vapore toccando il suolo si sciolgono in acqua, e con quello dell'elettricità che si appalesa durante la formazione della rugiada o la caduta della neve. Seguendo la stessa idea si comprende ancora perchè il tuono sia ignoto nelle regioni in cui non piove giammai, e ricorra invece conformemente alla frequenza delle piogge temporalesche ; quindi meglio di estate che d'inverno, più spesso nei climi caldi che nelle regioni vicine alle zone polari. E Francklin, come giustamente fa osservare lo stesso autore, non ebbe scintille dal filo a cui aveva ligato il suo cervo volante, prima che le nubi che vi passavano sopra avessero cominciato a risolversi in pioggia.

Dietro queste considerazioni egli non è più lecito riguardare una nube come un immenso conduttore elettrizzato che per mezzo del fulmine si scarica della sua elettricità libera sopra un'altra nube o sulla superficie della terra. Se così fosse, da una nube non si potrebbe avere che una sola scarica, mentre l'osservazione ha chiarito che se ne possono avere parecchie di seguito. L'elettricità da cui deriva il fulmine, non preesisteva nella nube temporalesca, ma si svolge nell'istante della sua trasformazione in acqua ; di che si ha novella prova in quei rovesci di pioggia che sembrano tener dietro allo scoppio del fulmine, ma che in realtà lo seguono, come giustamente osserva il Palmieri considerando che la celerità non della luce soltanto ma del suono ancora sia maggiore di quella con cui cadono le gocce di pioggia. Or questa elettricità, che sappiamo esser positiva, produce intorno al luogo in cui si svolge ed a modo di onda un'ampia falda di elettricità negativa, seguita a sua volta da un'altra di elettricità positiva ;

ed il fulmine, che in piccole proporzioni è rappresentato dalla scintilla che scocca da un conduttore elettrizzato, non è che una scarica elettrica tra le due falde suddette, e tra una di esse e la superficie del suolo. E siccome nel noto sperimento del buca-carta si vede l'elettricità correre dal conduttore positivo al negativo, così il fulmine sarà discendente od ascendente, secondo che la scarica tra l'atmosfera e la terra avrà luogo nella regione della falda positiva o in quella della negativa. Quindi si comprende perchè talvolta le foglie degli alberi colpiti da fulmine si sieno trovate coperte di fango nella loro faccia inferiore.

Effetti del fulmine.

546. Gli effetti del fulmine non differiscono che in quantità da quelli di una scarica elettrica artificiale; quindi al pari di questi vanno distinti ancora in fisici, chimici e fisiologici.

Va nella prima classe la fusione dei corpi che il fulmine incontra sul suo cammino, e quindi la produzione delle *folgoriti*, ossia di quelle aggregazioni a forma di tubi lunghi talvolta fino a 20 piedi, e che variamente ramificati e fatti sempre più sottili fino a terminare in punte, s'incontrano nei terreni sabbiosi. La loro superficie vetrificata nell'interno e ruvida fuori, chiaramente fa conoscere che siano stati prodotti da una cagione che scostando le particelle della sabbia ha fuso quelle che ne sono state immediatamente colpite. Pfaff ebbe una piccola folgorite dall'isola di Amrum, in cui alcuni marinari la rinvennero scavando nella sabbia giusto nel luogo che avevano veduto colpire da un fulmine; e Beudant, Hachette e Savart n'ebbero artificialmente facendo che forti scariche elettriche passassero attraverso della sabbia, che essi avevano mescolata con sale per agevolarne la fusione.

È notevole ancora tra gli effetti fisici la forza con cui il fulmine riduce i corpi in frantumi, o ne sloga delle grandi masse. In Manchester si vide per opera di un fulmine rimaner traslocato di 9 piedi da un lato e di 4 dall'altro un muro alto 12 piedi e doppio 3, il quale separava una cantina da una cisterna.

L'accensione di sostanze infiammabili e la morte di uomini

ed altri animali sono effetti del fulmine sventuratamente troppo noti, perchè dovessimo intrattenerci a descriverli.

457. Presentando una punta metallica al conduttore di una macchina elettrica in azione, si vedrà immediatamente cadere il pendolino dell'elettroscopio di Henly di cui supponiamo provveduto il conduttore. La caduta di quel pendolino ci avverte che l'elettricità fluisce dal conduttore alla punta; ed il noto fenomeno del venticello elettrico ci chiarirebbe che lo stesso agente va disperso nello spazio per opera di una simile punta qualora fosse impiantata sul conduttore. È noto ancora che nel buio la punta presenta una stelletta nel primo caso ed un fiocchetto luminoso nel secondo. Parafulmini. Fuochi di S. Elmo.

Questi fatti ci dichiarano — 1° La tendenza del fulmine a colpire le sommità delle torri e dei campanili, gli alberi di alto fusto, gli angoli salienti degli edifizii, ecc. — 2° L'efficacia dei parafulmini in preservare gli edifizii da questa spaventevole meteora — 3° La ragione dei così detti *fuochi di S. Elmo*, denominati *Castore e Polluce* dagli antichi, e che nei temporali specialmente appariscono come tante fiammelle su i corpi acuminati esposti all'aria ». Gli antichi « dice Kämtz nella sua *Meteorologia*, riferiscono molti fenomeni di tal genere, e non di rado, come in Livio, vengono annoverati tra i prodigi. Non rare volte sulle lance dei soldati o sugli alberi delle navi scorgevansi delle fiamme accompagnate da un rumore zufolante, e che da un sito saltavano ad un altro. Pare che il tempo dell'apparizione sia stato di preferenza l'inverno, almeno il maggior numero di quelli che sono a mia conoscenza avvennero in quella stagione. Il racconto che segue di Forbin ci dà un fedel quadro di ciò che in casi somiglianti succede. Nell'anno 1696 (così egli narra) accumulavasi d'improviso nel corso della notte un forte annuvolamento, dietro cui dei lampi spaventevoli e colpi di tuono ebbero effetto. Avendo apprensione di una forte burrasca io feci abbassare tutte le vele. Noi vedemmo più di 30 fuochi di S. Elmo sul legno. Uno tra gli altri che trovavasi sulla banderuola dell'albero maestro, era alto più di un piede e mezzo. Io spedii un ma-

rinaro, perchè me lo andasse a prendere. Giunto questi colassù, sentì tal fuoco scoppiettare in modo simile a quello che odesi allorchè si fa bruciare della polvere da sparo bagnata, io gli comandai di togliere la banderuola e calare con essa. Ma non appena egli avevala tolta, il fuoco l'abbandonò, e si collocò sull'estremità dell'albero, senza che fossimo riusciti a scacciarlo da colà dove rimase per buon tratto di tempo fino a che svanì a poco a poco ».

« Sulle montagne il fenomeno sembra forse men raro, allorchè in prossimità passano nuvole da temporali ; così Saussure ne fa menzione nelle Alpi , ed io stesso lo vidi colassù molto bello ».

Fulmine per contraccolpo.

458. Ponendo delle rane di fresco uccise in vicinanza di una macchina elettrica, le vedremo convellersi quando si tirerà una scintilla dal conduttore. Quel movimento è l'effetto dell'induzione, per la quale l'elettricità prima cacciata dal corpo della rana nel suolo, vi ritorna subito che quella forza ripellente è cessata. Ciò che in piccolo osserviamo attesa la debolezza dei nostri apparecchi , può iu grande proporzione venir prodotto da una nube temporalesca. L'induzione elettrica che ne segue, estendendosi a grandi distanze, può negativamente elettrizzare il suolo e gli oggetti soprapposti ; ed allorchè la causa di questo disquilibrio verrà meno in conseguenza di una scarica, l'elettrico rientrando con impeto nei corpi donde era stato espulso, fulmina tutto ciò che incontra sul suo cammino. « Pochi avvenimenti di tal genere, dice lo stesso Kämtz, avranno destato tanto grido, quanto quello che ebbe luogo in Inghilterra nel dì 19 Luglio 1785, e di cui Brydone ci diede una minuta descrizione. Dopo una bella e serena mattinata mostraronsi verso le ore undici delle nuvole al SE dell'osservatore, e tra mezzodì ed un'ora molti lampi scorgevansi da lontano, ai quali dopo 25 in 30 minuti secondi tenne dietro il tuono. Tutto ad un tratto Brydone sentì una forte esplosione, come se fossero state scaricate molte arme da fuoco rapidamente l'una dopo l'altra, senza però che prima si fosse manifestato un lampo. Non lungi dall'abitazione di lui

giaceva morto a terra in un coi cavalli, colpito dal fulmine, un uomo di cognome Lauder, il quale guidava una carretta carica di carboni; il compagno di esso che seguivalo con altra carretta sentì solamente l'esplosione e vide cadere i cavalli, ma non vide mica lampo alcuno come neanche risentì scossa. Molti carboni vedeansi per terra intorno alla carretta. Circa un piede e mezzo dietro ciascuna ruota si rinvenne sulla strada un buco del diametro di 2 pollici, il cui centro giaceva esattamente nei solchi delle ruote. Ciò fu ancora confermato da altri testimoni oculari. Nelle vicinanze accaddero pure accidenti consimili. Un pecoraio pascolava il suo gregge sur un campo vicino. Ad un tratto egli vide un agnello cader al suolo estinto, sentendo nell'istante medesimo un'impressione come se del fuoco gli fosse passato sul viso. Ciò accadde circa un quarto di ora prima della disgrazia di Lauder ed a non maggior distanza di 300 yards dal luogo dove questi restò ucciso. Una donna che non lungi falciava dell'erba cadde a terra dietro un forte colpo riportato al piede, ed il parroco Bell racconta di aver pure osservato un sensibile scotimento nel suolo del suo giardino poco prima della disgrazia ».

459. Il fenomeno della grandine è intimamente connesso alle fasi elettriche dell'atmosfera, e perciò ne facciamo parola in questo capo. Grandine.

Se ne distinguono due specie, la *minuta* e la *grossa* o *grandine* propriamente detta. La grandine minuta consiste in pallottoline di neve di una a due linee di diametro, e suol cadere nei tempi burrascosi dell'inverno o della primavera. L'altra si compone di pezzi di ghiaccio o *grani* più o meno grossi, che d'ordinario hanno un nucleo nevoso ed in conseguenza opaco; e talvolta nello stesso grano si son visti alternati gli strati opachi e trasparenti. Nelle raccolte di osservazioni meteorologiche si parla di grandini grosse quando un uovo di pollo ed anche della grandezza di un pugno; ma bisogna distinguere i grani che cadono da quelli che alla fine del temporale si veggono sul suolo, imperocchè questi potrebbero esser

risultati dalla congelazione di più grani riuniti; e così pare che siasi prodotto un pezzo di grandine osservato in Ungheria nel Maggio del 1802, e che aveva 2 piedi di altezza su 3 piedi in quadro di base.

La grandine non è rara nelle elevate latitudini; e sulle alte montagne, ad esempio le Alpi, è piuttosto frequente. Ma rarissimamente si vede nelle basse pianure dei tropici: a Cumana, per esempio, è ignota; ed una grandine caduta nel 1721 alla Martinicca destò universale meraviglia. Al contrario nella città di Messico, sopra un suolo alto 7200 piedi sul livello del mare, cadde tanta grandine nel 1830 che nelle strade si elevava all'altezza di due piedi. Donde pare che la mancanza della grandine in quelle basse regioni derivi dalla fusione dei grani prima di giungere al suolo.

Fin dai tempi di Aristotile erasi osservato che la caduta della grandine suol essere preceduta da un rumore secco, e talvolta così forte da coprire quel del tuono. Questo rumore è prodotto dal continuo rimescolarsi dei grani per opera di venti impetuosi da cui sono qualche volta trasportati presso che orizzontalmente.

I temporali da grandine per lo più percorrono lunga estensione di paese, lasciando immuni le contrade che si trovano lateralmente al loro cammino; quindi il volgo chiama *travi di grandine* le nubi temporalesche che la producono. Uno dei casi più notevoli di simil fatta si è presentato nel temporale ch'ebbe luogo in Francia nel 1788. Cominciò di buon mattino nella parte meridionale di quella contrada, ed in poche ore pervenne fino in Olanda. La grandine cadde su due zone parallele dirette da SO a NE, di cui l'una fu lunga 175 leghe con una larghezza media di 4, e l'altra con una larghezza media di 2 leghe n'ebbe 200 di lunghezza. Le due zone restarono separate da una terza larga 5 leghe, ed in questa del pari che lateralmente alle prime non cadde che fortissima pioggia.

L'altezza delle nubi temporalesche produttrici di gragnuola è assai varia, imperocchè se la grandine si è trovata sulle punte più elevate delle Alpi, non di rado i viaggiatori hanno go-

duto di un ciel sereno sulle vette dei monti, mentre le sottoposte valli erano tempestate dalla grandine.

Volendo coordinare il fatto della grandine ai principii della scienza, fa d'uopo cominciare dall' indagare come una prodigiosa quantità di ghiaccio, ad un'altezza sovente assai minore di quella che fissa il limite delle nevi perpetue, possa in brevissimo tempo formarsi in seno all'atmosfera. Che l'elettricità vi debba aver una gran parte, non sapremmo dubitarne; ma il modo della sua azione non pare che finora sia stato definito in una maniera soddisfacente. Volta, partendo dal fatto da lui scoverto che l'evaporazione fosse sorgente dell'elettricità atmosferica, fatto che più tardi fu rivocato in dubbio, immaginò che la grandine fosse prodotta nel seguente modo. Egli suppose che ad una nube sovrastasse una massa di aria abbastanza secca, perchè gran parte del vapore vescicolare che si trova nella faccia superiore fosse rapidamente trasformata in vapore elastico, che salendo in alto non tarderebbe a trovare dell'aria più fredda che lo cangiasse nuovamente in vapore vescicolare. Intanto pel fatto dell'evaporazione avvenuta nella nube, questa si sarà tanto raffreddata da mutarsi in fiocchi di neve, i quali secondo le idee del Volta sull'evaporazione, restavano elettronegativi, mentre il vapore salito in alto e poi di nuovo addensato era divenuto elettropositivo. Ecco due nubi orizzontalmente parallele, e diversamente elettrizzate, di cui la superiore attrarrà i fiocchetti di neve dell'inferiore, per quindi respingerli in basso, non altrimenti che avviene nel noto fenomeno della dansa elettrica. In questo ballottamento tra i due strati nuvolosi il vapore vescicolare della nube superiore venendo a contatto coi fiocchi di neve dell'inferiore, vi resta successivamente gelato, e forma quegli strati di ghiaccio che si vedono nei pezzi di gragnuola, e che andranno crescendo di numero finchè l'attrazione della nube superiore potrà vincerne il peso.

Questa ipotesi del Volta e per la chiarezza in cui presenta la cagione del rumore che suol precedere la caduta della grandine e perchè si trovava in perfetta armonia coll'idea che la

evaporazione fosse sorgente elettrica, fu accolta da tutti i fisici di quel tempo, e riguardata come quella che rivelasse il vero modo di produzione del fenomeno. Indi il Bellani considerando la fisica costituzione dei pezzi di grandine venne nell'opinione che la loro genesi non si potesse altrimenti concepire se non supponendo che le gocce di acqua di una nube che si scioglie in pioggia, restino congelati in contatto dei fiocchetti di neve in cui si è trasformato il vapore vescicolare di una nube più bassa, dietro un intenso raffreddamento prodottovi da espansione per forza ripellente elettrica.

Senza farci ad esaminare le diverse obbiezioni a cui queste due ipotesi sono andate incontro, ci limitiamo soltanto ad osservare che, dietro gli ultimi progressi della elettrologia meteorica per opera del Palmieri, esse son divenute inammissibili del pari di ogni altra ipotesi che si volesse escogitare sul supposto di un'elettricità propria delle nubi prima che vadano a risolversi in pioggia o neve. Perlochè la spiegazione del come si formi la grandine rimane tuttavia ignota.

CAPO OTTAVO.

FENOMENI LUMINOSI DELL'ATMOSFERA.

Colore dell'aria.

460. Quantunque l'aria sia il corpo più trasparente che si conosca, purtuttavia non lo è tanto da lasciar passare indistintamente tutti i raggi che la incontrano. Se così non fosse, l'aspetto del cielo diverrebbe spaventevole, perchè in mezzo ad una volta perfettamente buia splenderebbe il sole abbagliante. Ciò che forma il chiarore della volta celeste è appunto la luce riverberata dalle molecole dell'aria; quindi è che l'areonauta quando si eleva nelle alte regioni dell'atmosfera, in cui l'aria è molto rara, vede il cielo presso che oscuro.

L'aria non rinvia indistintamente i raggi di qualsiasi colore, e perciò avviene che non sia bianca. Hassenfratz analizzan-

do col prisma la luce del sole prossimo al tramonto vide che mancava tutta la parte inferiore dello spettro, stante che questo appariva composto dalle sole zone che si estendono dal rosso al verde. Quindi è che i raggi solari nei momenti che seguono immediatamente il levarsi dell'astro o ne precedono il tramonto, proiettano una luce rossa su gli oggetti che incontrano sul loro cammino.

Dallo stesso fatto risulta ancora che l'azzurro della volta celeste nasce dai raggi riverberati dalle molecole dell'aria; e se questo colore riesce insensibile nelle falde di aria di poca spessezza, si avverte al contrario, quando la massa giacente tra l'oggetto e l'occhio dell'osservatore, è assai grande. Quindi è che le montagne a grandi distanze ci appariscono ancor esse di color azzurro, che attesa l'oscurità del fondo ci sembra più carico di quello del cielo. Questo colore non si vede giammai comunicato agli oggetti bianchi ancorchè lontanissimi, e ciò perchè la combinazione dell'azzurro dell'aria coi raggi rossi che essa trasmette torna a riprodurre lo stesso colore bianco. Quindi è che la neve sulle vette dei monti non partecipa dell'azzurro di cui questi si veggono ricoperti.

Il colore dell'aria non è poi egualmente carico in tutta la estensione della volta celeste. Allo zenit si mostra più vivo che verso l'orizzonte, in cui la presenza del vapore vescicolare, ch'è bianco, lo rende più o meno sbiadito; e quando l'atmosfera è sopraccaricata di vapore, tutta la volta celeste ci apparisce biancastra.

461. Prima che il sole si levi e dopo ch'è tramontato, il cielo si vede illuminato da una luce diffusa, la quale dura per un tempo più o meno lungo, secondo la diversa purità dell'aria e la latitudine del luogo di osservazione. Questo chiarore diffuso costituisce il *crepuscolo*, a cui si danno gli aggiunti di *matutino* e *vespertino* per distinguere quello che precede la nascita del sole dall'altro che ne segue il tramonto. **Crepuscoli.**

La luce crepuscolare ci viene dai raggi solari riverberati dalle molecole del segmento atmosferico che poggia sul nostro orizzonte sensibile. Quindi il fenomeno avrà cominciamento

nel mattino e termine nella sera, quando il sole si troverà di tanti gradi sotto il nostro orizzonte, che se fosse più basso, nessuno dei suoi raggi potrebbe penetrare in quel segmento della massa aerea che forma la nostra atmosfera. Questa depressione si calcola a 18 gradi; ma è facile comprendere che questo numero debba variare in ragione inversa del grado di purezza dell'atmosfera, imperocchè le vescichette di vapore o i piccoli fiocchi di neve in essa galleggianti, rifletteranno i raggi solari meglio che non farebbero le sole molecole dell'aria e quindi daranno maggior durata al crepuscolo. Così nell'interno dell'Africa, in cui l'aria è talmente pura che Bruce vide il pianeta Venere in pieno giorno, non vi è che un breve intervallo di tempo tra il buio della notte ed il sorgere del sole sull'orizzonte. Al contrario nel Groenland la notte non raggiunge la sua perfetta oscurità se non quando il sole è sceso di quasi che 30° sotto l'orizzonte. Se dovesse scendere di altrettanto nella regione tropicale, quivi il crepuscolo dovrebbe durare almeno due ore, mentre nel Chilì non giunge a durare un quarto di ora, ed a Cumana non va oltre a pochi minuti.

Oltre all'influenza della purità dell'aria sulla durata del crepuscolo avvi ancora quella della latitudine del luogo, imperocchè come questa si aumenta, sempre più inclinato al piano dell'orizzonte ed in conseguenza più lungo diviene l'arco del moto diurno del sole, che ha 18° di proiezione sul verticale. Quindi è che per eguale purità di aria la durata del crepuscolo viene crescente dall'equatore ai poli.

Scintillazione delle stelle.

462. Le stelle, specialmente se sieno prossime all'orizzonte, hanno una luce tremolante che le fa sembrare di allontanarsi per un istante dal loro sito per ritornarvi nell'istante che segue. A quest'apparente oscillazione va non di rado congiunto un mutamento nell'intensità e talvolta nel colore stesso della luce, la quale or sembra brillante, or prossima ad estinguersi; alcune volte sembra predominarvi la tinta verde, tal'altra la rossa, o l'azzurra. Questo fenomeno, frequente nelle stelle fisse, raramente si osserva nei pianeti; e se talvolta vi si mostra, è sempre poco sensibile.

Per dichiararne la cagione, rappresentiamo con *ab* (Fig. 421) uno strato dell'atmosfera, e con *cs* un pennello luminoso proveniente dall'astro *c*. Se l'aria sovrastante alla falda *ab* è meno densa di questa, il raggio *cs* dovendosi vieppiù avvicinare alla normale d'incidenza si rifrangerà secondo *so*, e giungerà all'occhio dell'osservatore come se venisse dal punto *c'* giacente sul prolungamento di *os*. Ma se dopo un istante una corrente di aria calda invadendo il luogo di *ab*, vi sostituisca uno strato di fluido che sia meno denso di quello che gli sta sopra, allora il raggio *cs* maggiormente allontanato nella sua rifrazione dalla normale d'incidenza, prenderà la via *sm* nella quale più non incontrerà l'occhio dell'osservatore ; ma lo potrà in vece il raggio *ct*, similmente rifratto secondo *to*, e che farà vedere l'astro *c* in *c''* sul prolungamento di *ot*. E così l'astro *c* sembrerà oscillare da *c'* in *c''* pel continuo avvicendarsi di strati atmosferici variamente densi. E questa spiegazione è convalidata dal vedere che sotto l'azione dei raggi solari la brace accesa ci presenta una superficie tremolante.

Il piccolissimo valore angolare di questo movimento fa che sia sensibile nelle stelle fisse le quali ci appariscono come tanti punti lucidi, e poco si avverta nei pianeti che hanno un diametro apparente di 30 a 40 secondi. Quindi è che se attraverso di un cannocchiale l'orlo del loro disco ci apparisce qualche volta tremolante, il centro però si vedrà sempre immobile.

Se la scintillazione è più forte in vicinanza dell'orizzonte, ciò deriva dall'essere i cangiamenti di densità dell'aria più frequenti negli strati atmosferici che son prossimi al suolo. Se questi cangiamenti si estendono anche alle regioni superiori dell'aria, come avviene nell'approssimarsi delle piogge autunnali, allora si veggono scintillare anche le stelle vicine allo zenit. Al contrario nella stagione secca del tropici Humboldt non ha vista che una leggiera scintillazione e nelle stelle soltanto che stavano prossime all'orizzonte.

Rispetto poi ai cangiamenti d'intensità e colore nella luce degli astri scintillanti, pare che si dovessero ascrivere ad ef-

fetti d'interferenza prodotta dalla diversa lunghezza di cammino che i raggi di luce debbono percorrere in conseguenza del loro vario deviamento.

Iride 463. Rappresenti *dce* (Fig. 423) una sezione normale all'asse di un recipiente cilindrico di cristallo di sottile parete, e pieno di acqua alquanto torbida. Pongasi il cilindro verticalmente in una camera oscura, e la sezione *dce* sia quella del piano orizzontale che passa pel centro del foro *b*, pel quale un pennello di luce seguendo lo stesso piano entra nella camera oscura e va ad incontrare la superficie del cilindro nel punto *c*. Guardando il recipiente dall'alto in basso, vedremo disegnato nell'acqua il cammino del pennello luminoso, e le parziali rifrazioni nei punti *c*,*d*,*e*, ecc. per le quali emergeranno dal cilindro dei raggi di luce, che raccolti sopra un corpo bianco vi dipingeranno dei piccoli spettri. Della quale dispersione ci renderemo facilmente ragione, considerando che gli elementi della superficie cilindrica si confondono in *c*,*d*, *e*, ecc. coi loro piani tangenti, e che in conseguenza i raggi emergenti vi debbano andar dispersi come se fossero passati per prismi di acqua con angoli rifrangenti eguali a quelli che formano i rispettivi piani di contatto.

Ciò che si osserva nel descritto sperimento, va ripetuto in una goccia di pioggia colpita dai raggi del sole; e poichè la riflessione e rifrazione debbono aver luogo in un piano normale alla superficie d'incidenza, così il pennello di luce penetrando nell'interno della goccia non abbandonerà giammai il piano del cerchio massimo determinato dalla prima incidenza. Ponendo che *ab* (Fig. 422) rappresenti quel pennello, facciamoci ad esaminare ciò che ne avverrà dopo la 1ª riflessione in *c* e la seconda rifrazione in *e*. Il pennello incidente *ab* e l'emergente *cd* prolungati dovranno incontrarsi in un punto *n* che per la figura sferica della goccia dovrà giacere sul prolungamento del raggio di figura *oc* condotto pel punto della 1ª riflessione. Quindi sarà l'angolo:

$$bno = bco - cbn = obc - (obn - obc) = 2obc - obn.$$

Ma *bno* è la metà dell'angolo *anb* che rappresenta il deviamento patito dal pennello incidente, ed *obn*, *obc* sono gli angoli d'incidenza e rifrazione ; perciò indicando con D il deviamento, con *i* ed *r* gli angoli d'incidenza e rifrazione, avremo per l'equazione precedente :

$$D=4r-2i.$$

Or per un dato valore di *i* quello di *r* dovendo variare secondo i diversi elementi dello spettro , è chiaro che i raggi paralleli nel pennello incidente, emergeranno divergenti dal punto *e* ; e se consideriamo che *i* non può esser lo stesso per tutti i raggi del fascetto incidente, avremo una nuova cagione di divergenza nel fascetto che emerge, e quindi si farà chiara la sua impossibilità a riuscire efficace per l'occhio dell'osservatore situato alla distanza che lo separa dalla goccia di pioggia.

Ma l'angolo di deviamento D ammette un valore massimo; e tutte le quantità che sono capaci di un valore massimo o minimo, in vicinanza di questi limiti presentano variazioni presso che nulle. Laonde se il pennello incidente, composto di raggi paralleli, abbia tale direzione da emergere dalla goccia sotto l'angolo di massimo deviamento, i suoi raggi resteranno sensibilmente paralleli e potranno conservare la stessa efficacia a qualunque distanza. Or combinando l'equazione precedente coll'altra $\operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r$ (n° 329), si ottiene pel valore di *i* corrispondente al valore massimo di D [1] :

[1] Differenziando le due equazioni:

$$D=4r-2i \quad \text{e} \quad \operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r,$$

ed eliminandone *dr*, si avrà:

$$\frac{dD}{di}=\frac{4\cos i-2n\cos r}{n\cos r}=\frac{4\cos i-2\sqrt{n^2-\operatorname{sen}^2 i}}{\sqrt{n^2-\operatorname{sen}^2 i}}.$$

Or dovendo per la condizione richiesta esser $\frac{dD}{di}=0$, si avrà:

$$4\cos i-2\sqrt{n^2-\operatorname{sen}^2 i}=0\text{, donde } \cos i=\sqrt{\frac{n^2-1}{3}}.$$

E la derivata seconda ci farebbe conoscere che questo valore di *i* rende D un massimo.

$$\cos i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}.$$

Applicando questa formola ai raggi rossi, pei quali rispetto all'acqua si ha $n = \frac{108}{81}$, ne risulta $i = 59°,23',30''$. Quindi le equazioni: $D = 4r - 2i$ e $\operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r$ ci daranno:

$$r = 40°,12',10'' \text{ e } D = 42°,1',40''.$$

Similmente operando rispetto ai raggi violetti pei quali si ha $n = \frac{109}{81}$, otterremo:

$$i = 58°, \quad D = 40°,17'.$$

Or poniamo che A (Fig. 425) sia una goccia di pioggia, incontrata dal raggio solare *mn* sotto l'incidenza che rende massimo il deviamento sofferto dall'elemento rosso che dietro una sola riflessione emerge secondo *so*, facendo l'angolo *mto*= 42°,1',40''. Pel punto *o* preso sul raggio *so* conducasi la *oc* parallela al raggio incidente *mn*, e s'immagini che la *so* giri intorno alla *oc* sotto l'angolo costante *soc*: il punto *s* descriverà un cerchio il cui piano sarà perpendicolare ad *oc*, e tutte le gocce di pioggia che si troveranno sulla circonferenza di quel cerchio per un' ampiezza di circa 30', qual'è prossimamente il diametro apparente del sole, invieranno verso *o* una falda di raggi rossi della spessezza di 30'.

Dallo stesso punto *o* conducasi ancora la *ov*, inclinata alla *oc* di 40°, 17', qual'è appunto il deviamento massimo pei raggi violetti, e s'immagini la *ov* similmente girare intorno alla *oc*: ne avremo che tutte le gocce di acqua che come B si troveranno sulla circonferenza descritta da *v* e sopra una fascia larga 30' invieranno verso *o* una falda di raggi violetti di egual doppiezza.

Or se il calcolo eseguito rispetto ai raggi rossi e violetti si rifaccia per gli altri elementi prismatici, si troveranno per D dei valori intermedii ai due già trovati; dimodochè sul pia-

no prospettico di una pioggia continua l'occhio di un osservatore situato in o vedrebbe i colori del prisma ordinati su sette zone circolari concentriche, che formerebbero una fascia avente il rosso all'esterno ed il violetto nell'interno. Ma perchè le sette zone rimanessero distinte, la fascia dovrebbe avere l'ampiezza di $30'.7=3°,30'$, mentre la distanza tra l'arco esterno della zona rossa e l'interno della violetta non è che di $2°,14',40''$. Le zone saranno dunque in parte soprapposte, e le tinte non appariranno nette che verso gli archi estremi.

Passiamo ora a determinare il deviamento che i raggi solari patiranno emergendo dalla goccia di acqua dopo due riflessioni interne. Rappresenti ab (Fig. 424) il pennello incidente, e sia ef quello che emerge dalla goccia dopo le due riflessioni in c e d. L'angolo di deviamento D è rappresentato dall'angolo azf, vale a dire dall'angolo z del quadrilatero $zeab$; ed in conseguenza si ha:

$$D=360°-(2obz+boe).$$

Ma è l'angolo:

$$obz=180°-i\ ,\ \text{e quindi}\ 2obz=360°-2i\ ;$$

e l'angolo:

$$boe=360°-3boc=360°-3(180°-2r)=6r-180°\ ;$$

quindi si avrà:

$$D=180°+2i-6r.$$

Applicando a questa formola il metodo esposto nella nota precedente, si troverà che D ammette un valore minimo corrispondente all'incidenza i definita dall'equazione:

$$\cos i=\sqrt{\frac{n^2-1}{8}}.$$

Nella quale espressione ponendo successivamente i valori di n che convengono ai raggi rossi e violetti, si troverà:

pei raggi rossi : $i=71°,50'$, $D=50°,58'$;
pei raggi violetti : $i=71°,26'$, $D=54°,\ 9'$.

Si avrà così un secondo arco, ed è l'arco esterno, il quale presenterà le sue zone in ordine inverso a quello dell'arco interno, poichè avrà il violetto sul lato convesso ed il rosso sul concavo; e le tinte saranno anche meno vivaci che nel primo, essendo i raggi indeboliti da due riflessioni.

Or l'osservazione dimostra che queste determinazioni numeriche sono in perfetto accordo col fatto, e che realmente il piano dell'iride è perpendicolare alla congiungente il centro del sole coll'occhio dell'osservatore, e che su questa congiungente sta il suo centro.

Miraggio. 464. È noto che un pennello di luce passando da un mezzo in un altro meno rifrangente, si allontana dalla normale; e che se l'angolo d'incidenza abbia per seno il valore $\frac{1}{n}$ (n° 329), la rifrazione si cangerà in totale riflessione. Da questo principio dipende il fenomeno che l'armata francese osservò nel 1798 sulle pianure dell'Egitto; la favola di Tantalo parve realizzarsi nel soldato che vedendo in distanza un lago, correva per dissetarvisi, ma il lago gli fuggiva dinanzi colla velocità con cui egli si faceva a raggiungerlo.

Il suolo del basso Egitto è una grande pianura, sormontata da basse colline, sulle quali stanno le città ed i villaggi di quella contrada. Quando l'aria è calma ed il suolo è fortemente riscaldato dai raggi solari, quella pianura prende l'aspetto di un lago, perchè vi si vedono riflesse le immagini delle colline che sembrano altrettante isole. Questo è il fenomeno che i francesi dissero *mirage*, e che va prodotto nel seguente modo. L'alta temperatura del suolo si trasmette, attesa la debole conducibilità termica dell'aria, con una serie rapidamente decrescente fino all'altezza di parecchi piedi. Nel medesimo ordine con cui la temperatura di quelle falde va diminuendo, se ne accresce la densità; e perciò un raggio di luce che movendo in direzione molto inclinata al suolo, le incontri sotto una grande incidenza, sarà costretto a passare da una falda ad un'altra meno densa, e quindi ad incontrar bentosto l'angolo limite che cangerà la sua rifrazione in totale riflessione. Allora l'occhio

dell'osservatore situato in un punto *o* (Fig. 426) riceverà dall'oggetto *m* tanto i raggi che muovono direttamente da *m* verso *o*, quanto quelli che vengono rimbalzati per l'angolo limite sotto cui hanno incontrato le falde di aria prossime al suolo. Quindi i diversi oggetti, da cui si possóno avere questi due ordini di raggi luminosi, presenteranno le loro immagini riflesse da strati di aria prossimi al suolo non altrimenti che avverrebbe se fossero circondati da un lago.

Dietro ciò egli è facile comprendere che tra l'oggetto e l'osservatore debba esservi una certa distanza, perchè il fenomeno possa aver luogo. Così se l'osservatore passasse da *o* in o', non più sarebbe incontrato dal raggio *mro*, ma lo potrebbe essere dal raggio $m'r'o'$. Quindi si comprende perchè il lago sembrava fuggire, come il soldato francese cercava avvicinarvisi.

E di questa spiegazione si avrà una bella prova sperimentale, qualora si guardi ad un oggetto lontano in modo che il raggio visuale passi vicino ad una lamina metallica fortemente riscaldata; se ne avranno allora due immagini, l'una diretta e l'altra riverberata.

Nè il fenomeno del miraggio è proprio del basso Egitto: ma sotto forme diverse è stato ancora osservato sul lago di Ginevra, sulle coste del Baltico, sul mare del Groenland, ed in altri luoghi; e sempre col carattere distintivo di un'immagine inversa simmetrica a quella dell'oggetto reale.

FINE.



INDICE

LIBRO PRIMO

NOZIONI DI MECCANICA RAZIONALE.

LIBRO SECONDO

TEORIA DELLA GRAVITA'.

LIBRO TERZO

DELLE FORZE MOLECOLARI.

LIBRO QUARTO

IDROSTATICA ED IDRODINAMICA.

LIBRO QUINTO

ACUSTICA.

LIBRO SESTO

ELETTRICITA' E MAGNETISMO.

LIBRO SETTIMO

OTTICA.

LIBRO OTTAVO

COMPLEMENTO DELLA TEORIA DEL CALORE.

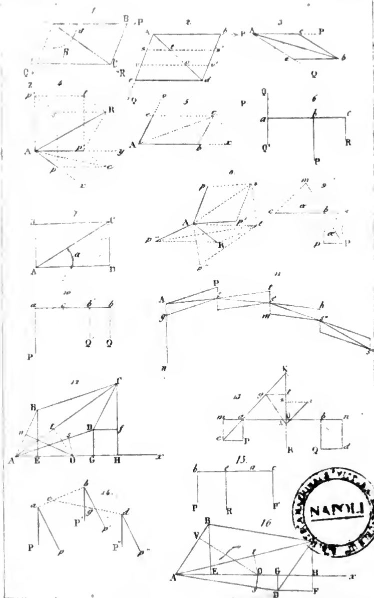
LIBRO NONO

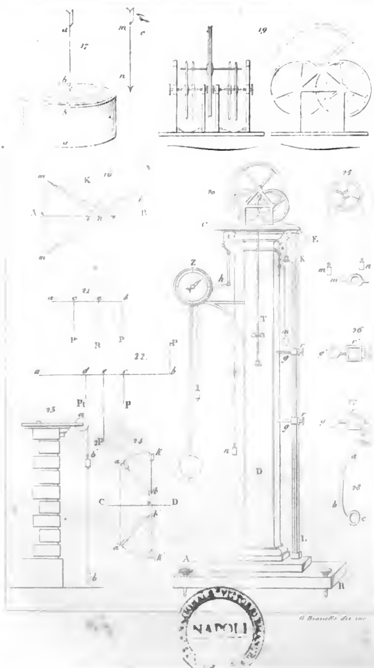
METEOROLOGIA

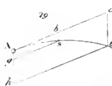
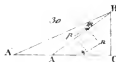
ERRATA-CORRIGE.

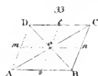
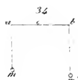
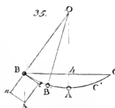
Pag.	*Ver.*	*Errori*	*Correzioni*
3	33	nate	note
6	penultimo	della teorica	dalla teorica
id.	ultimo	gravita	gravità.
9	4	$\frac{s}{s}$	$\frac{s}{t}$
17	28	tntti	tntte
26	6	una coppia	una coppia o è in equilibrio
49	6	At	Δt
60	antip.	rappresenta	rappresentata
66	25	della	dalla
67	9	φ	α
78	30	unoverso	senoverso
87	23	nel *Sb*	a *Sb*
id.	antip.	descíverà	descriverà
137	15	Quella	Quelle
139	13	avevano	hanno
142	15	del	dell'
148	32	la	le
749	5 dal basso	temperatara	temperatura
151	19	1 volume	1 il volume
152	4	(Bisogna scambiare le parole *residua* e *rientrata*)	
174	11	uno	una
230	15	*manometrico*	*manometro*
232	15	indrotto	introdotto
233	16	piana	piena
255	17	ciarca	circa
256	2	era	sia
338	19	tra tra	tra
345	27	elettrità	elettricità
346	9	B	D
348	7	Isolata	isolato
349	18	ellettico	ellittico
353	20	risultamenli	risultamenti
360	3	tormolina	tormalina
375	21	Fig. 138,1	Fig. 238,1
376	26 e 32	Fig. 138	Fig. 238
377	3	id.	id.
378	3	colamità	calamita
403	19	Wallaston	Wollaston
412	27	id.	id.

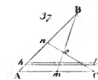
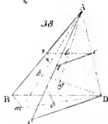
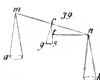
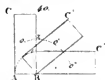
Pag.	*Ver.*	*Errori*	*Correzioni*
413	14	sasà	sarà
435	11	fallo	fatto
447	1	equilibro	equilibrio
481	1	Fig. 292	Fig. 298
id.	21	maggiore	minore
482	20	l' zione	l'azione
id.	penult.	incontrebbero	incontrerebbero
id.	id.	CD	BD
485	21	d_2^1	d_1^2
487	antip.	sorgenie	sorgente
489	21	10186	10188

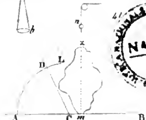




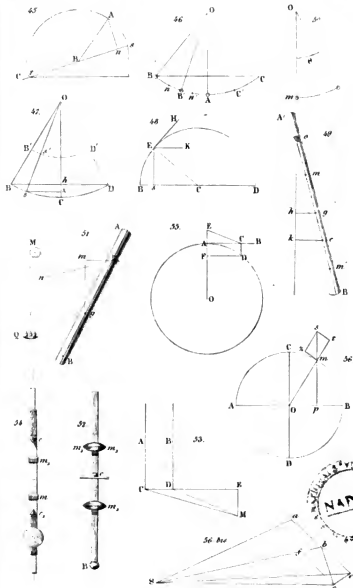





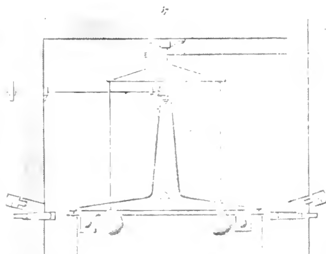







G. Bassetto dis. inc.

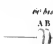

B. Pastore inc.







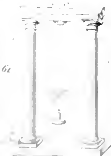




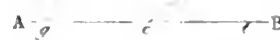






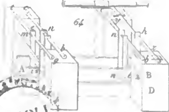


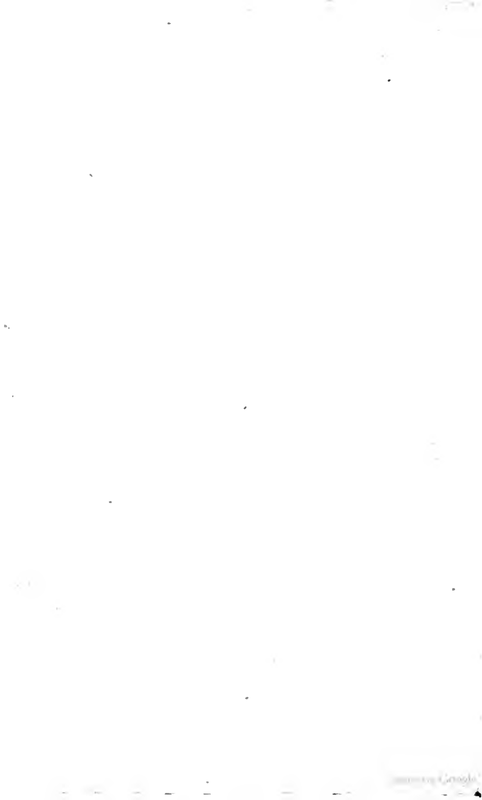


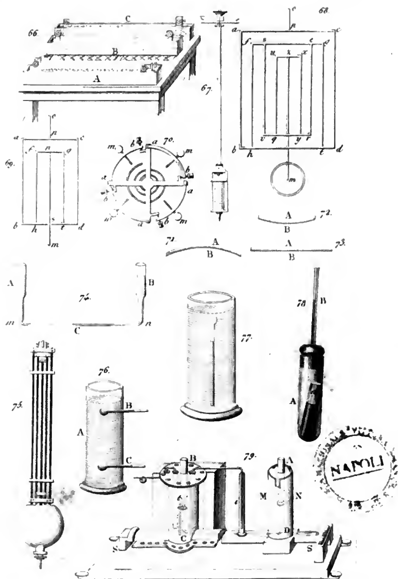




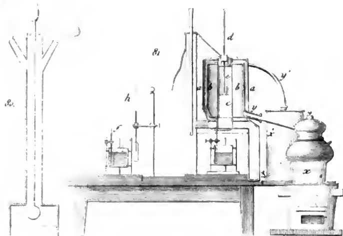


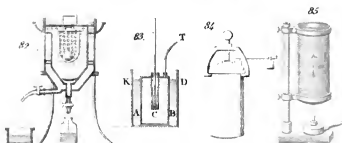




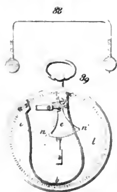


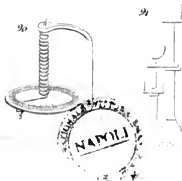
L. Ricci inc.

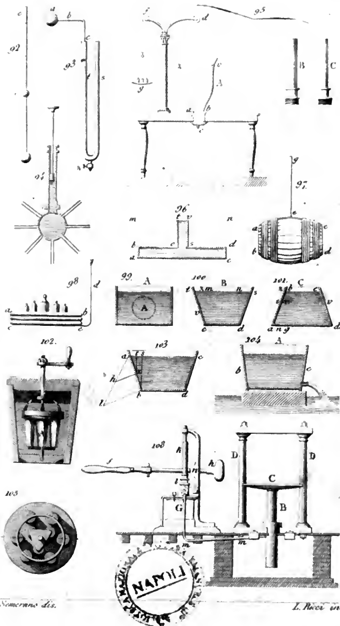

80.
81
d
a
b
e
c
y'
y
h
x'
x


82
83.
T
K
D
A
C
B
84
85


86
87


88
89
e
n
n'
l


90
91
NAPOLI



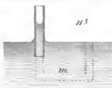
G. Semerano dis.   L. Ricci inc.

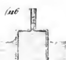
Tav. IX.

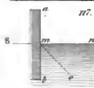


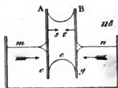






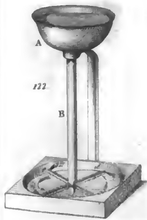








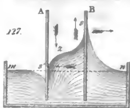










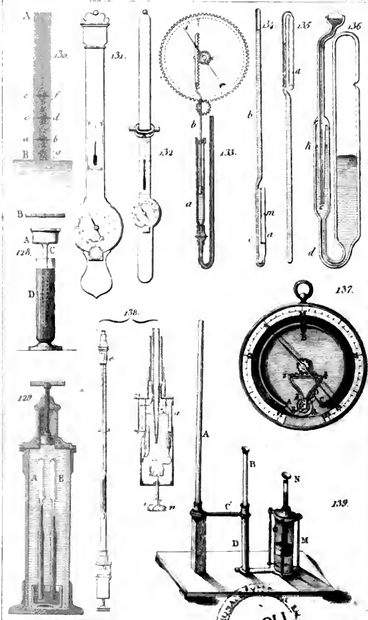




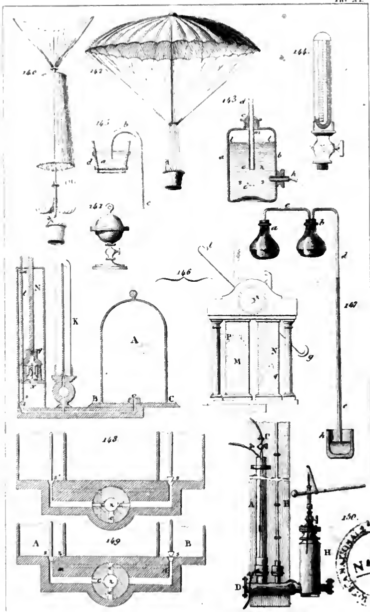


G. Senauro dis. L. Ricci inc.

Tav. X

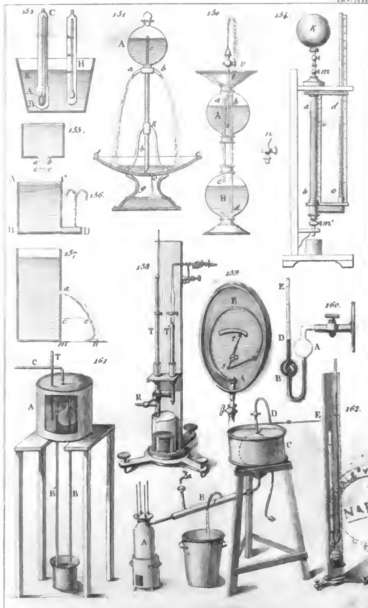


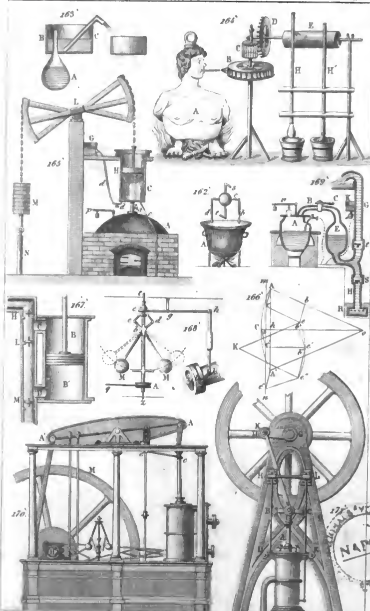
G. Simonetti dis. L. Rossi inc.



...ceraro dis.





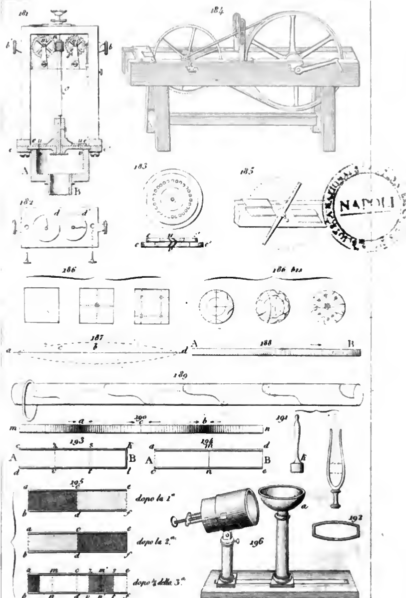


R. Zannetti dis. R. Vastola inc.

Tav. XIII

G. Semerano dis

L. Ricci inc



G. Semeraro dis.　　L. Ricci inc.

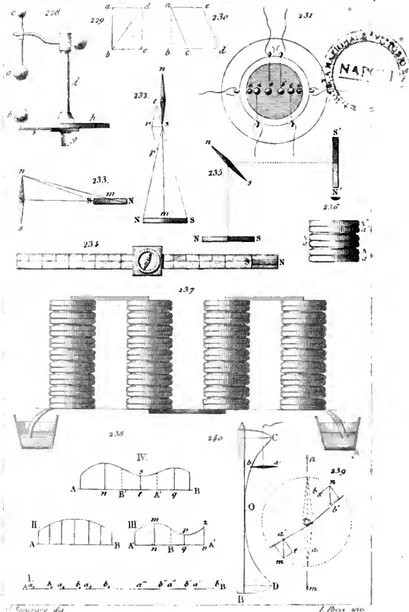
211. 202. 212. 199. 201. 200. 210. 214. 209. 215. 198. 213. 197.

G. Semeraro dis. L. Pucci inc.

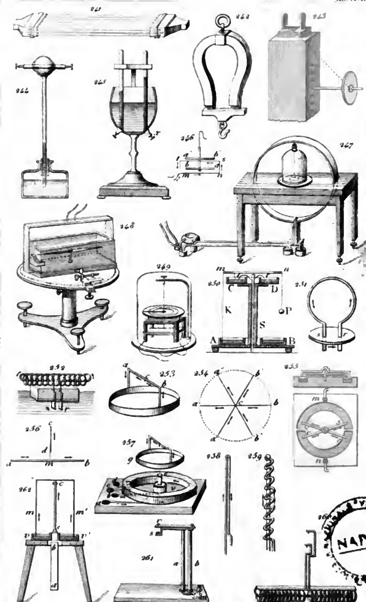
216 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227

G. Sementare dis. L. Ricci inc.

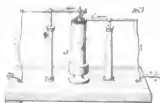




G. Sorcraro dis. — I. Ricci inc.



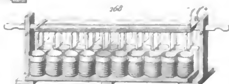
G. Senerare dis.   L. Ricci inc.







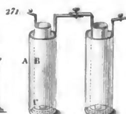






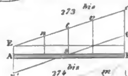






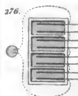




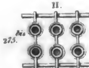


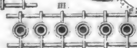




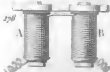








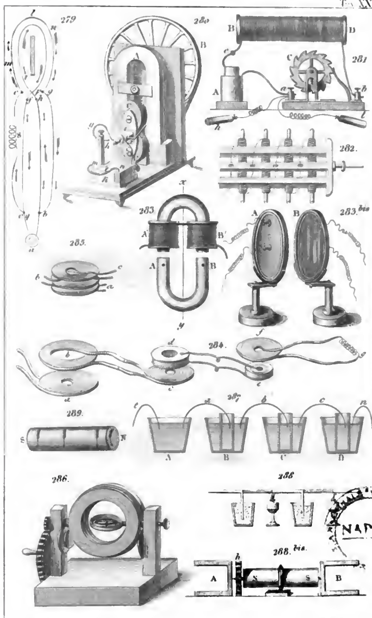






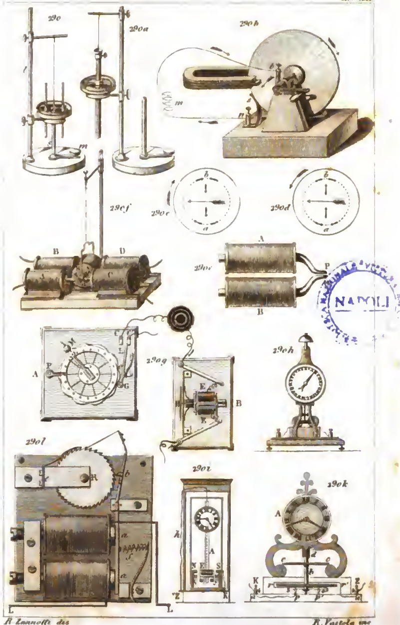


R. Zannotti dis. R. Vastola inc.



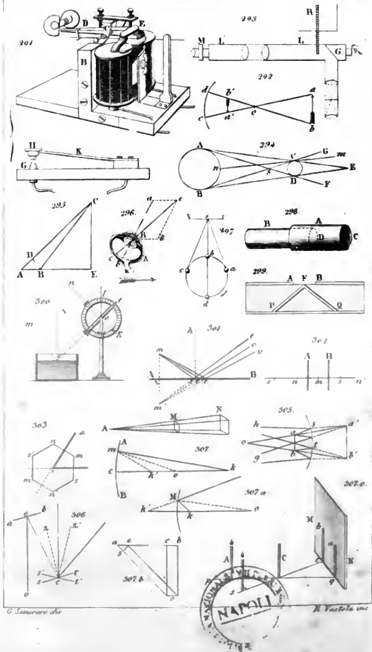
R. Zannotti dis. R. Vastola inc.



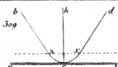


R. Zannotti dis. R. Vastola inc.

Tav. XXVI



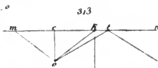
G. Senerare dis — R. Vastola inc

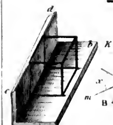


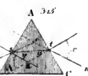


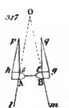


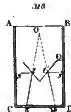


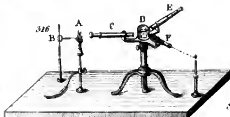


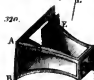


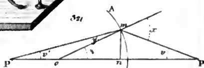


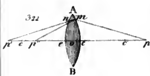


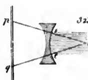


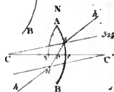


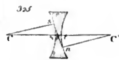


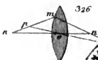


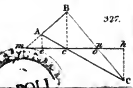












G. Semeraro dis. R. Vastola inc.

328 329 330

331 332 333

334 335 336 337

338 339 340

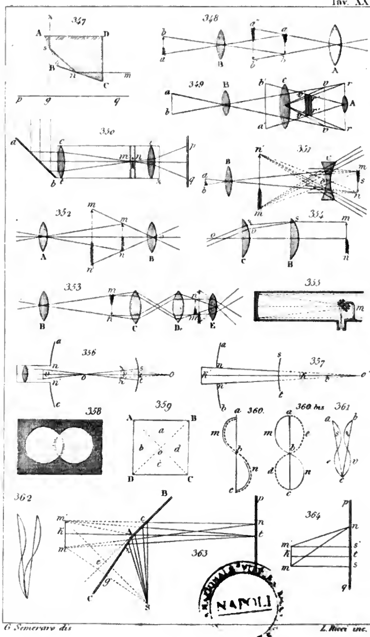
341 342 343

344 345 346



G. Semeraro dis. ... Ricci inc.

Tav. XXV



G. Semeraro dis

L. Ricci inc.

365 366 367

368 369 370

371 372

374 375

373

377

378 376.

380 bis

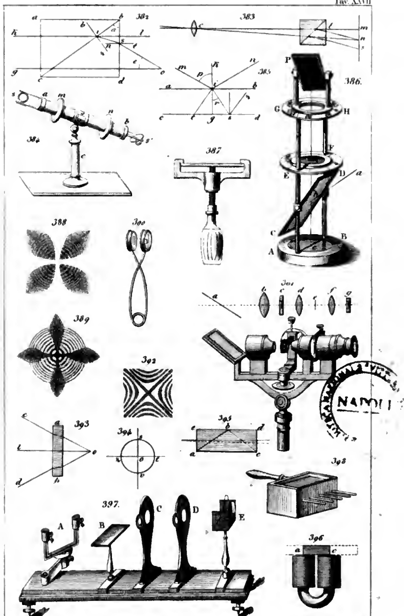
381. bis

379

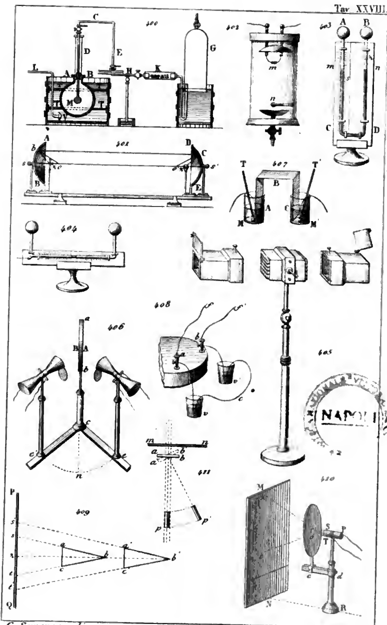
380. 381.

G. Semeraro dis. L. Ricci inc.

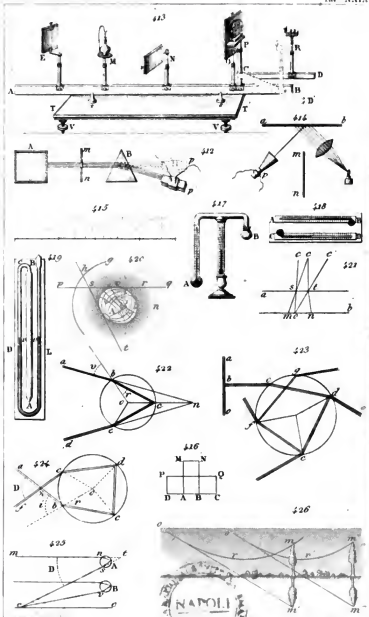




G. Semeraro dis.   L. Ricci inc.



G. Semeraro dis. L. Ricci inc.



G. Semeraro dis. L. Ricci inc.



